



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA
LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS MEDIANTE
EL MÉTODO DE MULTIESTACIÓN UTILIZANDO
TECNOLOGÍA LORAWAN.**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

AUTOR:

JEISON OLDEMAR ORTIZ BARRERA

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA
LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS MEDIANTE
EL MÉTODO DE MULTIESTACIÓN UTILIZANDO
TECNOLOGÍA LORAWAN.**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

AUTOR: JEISON OLDEMAR ORTIZ BARRERA

DIRECTOR: ING. HUGO OSWALDO MORENO AVILÉS, PHD.

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Jeison Oldemar Ortiz Barrera

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Jeison Oldemar Ortiz Barrera, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 08 de mayo de 2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Jeison Oldemar Ortiz Barrera', written in a cursive style.

Jeison Oldemar Ortiz Barrera

060431902-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS MEDIANTE EL MÉTODO DE MULTIESTACIÓN UTILIZANDO TECNOLOGÍA LORAWAN**, realizado por el señor: **JEISON OLDEMAR ORTIZ BARRERA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Milton Marcell Jaramillo Bayas, PHD. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	2024-05-08
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés, PHD. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	2024-05-08
Ing. Pedro Severo Infante Moreira, PHD ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	2024-05-08

DEDICATORIA

Agradezco a Dios, por guiar mi camino y permitir llegar a conseguir este logro. A mis padres, Melvin Ortiz y Sonia Barrera, quienes son mi inspiración e inculcaron en mí buenos valores, costumbres de superación y esfuerzos, sobre todo enseñarme que todo se puede conseguir con dedicación y esfuerzo. A mi familia por siempre estar apoyándome incondicionalmente. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por haberme acogido durante estos años, en especial a la FIE donde sus docentes supieron impartir conocimientos y valores para la vida profesional.

Jeison

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, “Saber para ser”; y los docentes de la Facultad de Informática y Electrónica (FIE), quienes han impulsado el espíritu investigativo en sus estudiantes.

Jeison

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN	xvi
SUMMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planificación del Problema	4
1.3 Justificación	4
1.3.1 <i>Justificación Teórica</i>	4
1.3.2 <i>Justificación Aplicativa</i>	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	6
1.4.2 <i>Objetivo Específicos</i>	6

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Descargas Atmosféricas	8
2.2 Método de Localización.....	11
2.2.1 <i>Magnetic Direction Finding (MDF)</i>	11
2.2.2 <i>Diference in time on Arrival (DTOA)</i>	12
2.2.3 <i>Diagrama de Veronoi</i>	13
2.2.4 <i>Multiestación</i>	14
2.2.5 <i>Electromagnetic Time Reversal</i>	14
2.3 Protocolo de comunicación LoraWan.....	15
2.3.1 <i>Capa de Aplicación</i>	18
2.3.1.1 <i>Constrained Appliacion Protocol (CoAP)</i>	18
2.3.1.2 <i>Protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)</i>	18

2.3.1.3	<i>Protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol)</i>	19
2.3.2	Capa de Transporte	20
2.3.2.1	<i>Protocolo UDP (User Datagram Protocol)</i>	20
2.3.2.2	<i>Protocolo TLS (Transport Layer Security)</i>	20
2.3.2.3	<i>Protocolo TCP (Transmission Control Protocol)</i>	21
2.3.3	Capa de Red o Internet	21
2.3.3.1	<i>IPv4/IPv6</i>	21
2.3.4	Capa Física	22
2.3.4.1	<i>Wifi (Wireless Fidelity)</i>	22
2.3.4.2	<i>Bluetooth Low Energy (BLE)</i>	23
2.3.5	Arquitectura de la Red LoRaWAN	23
2.3.5.1	<i>Bandas LoRaWAN</i>	25
2.3.5.2	<i>Seguridad LoRaWAN</i>	26
2.4	Tecnologías de detección y Localización de Descargas Atmosféricas	28
2.4.1	<i>Dirección de Llegada Basada en Interferometría (DOA)</i>	28
2.4.2	<i>Red ATDnet</i>	28
2.4.3	<i>Euclid (Red Europea)</i>	29
2.4.4	<i>Red Linet system</i>	30
2.4.5	<i>GLD360 (Red Global de Detección)</i>	31
2.5	Arquitectura LoraWan	31
2.6	Plataformas LoraWan	33
2.6.1	<i>Ubidots</i>	33
2.6.2	<i>ThingSpeak</i>	34
2.6.3	<i>Node-Red</i>	34
2.6.4	<i>The Things Netwoek (TTN)</i>	35
2.7	Características de los Dispositivos Electrónicos	36
2.7.1	<i>Características del módulo LoRaWAN</i>	36
2.7.2	<i>Características del Sensor AS3935</i>	37

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	40
3.1	Gestor de Tareas	40
3.2	Método de localización de descargas atmosféricas para la implementación del prototipo.	42
3.2.1	<i>Multiestación (método de localización de descargas atmosféricas)</i>	42

3.3	Protocolo de comunicación LoraWan para el prototipo de localización de descargas atmosféricas	46
3.3.1.1	<i>Capa MAC</i>	46
3.3.1.2	<i>Capa de Aplicación</i>	47
3.3.1.3	<i>Capa de Red</i>	48
3.3.1.4	<i>Distancia de Conexión de Dispositivos LoRaWAN</i>	48
3.4	Diseño del prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan.	48
3.4.1	<i>Ubicaciones Estratégicas de Cobertura a monitorear</i>	49
3.4.2	<i>Componentes del Prototipo</i>	50
3.4.2.1	<i>Modulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32</i>	50
3.4.2.2	<i>Sensor AS3935</i>	50
3.4.3	<i>Diagrama de conexión de los Dispositivos</i>	51
3.4.4	<i>Programación</i>	52
3.4.5	<i>Diseño del Prototipo para la detección de descargas atmosféricas</i>	58
3.4.5.1	<i>Conectividad de dispositivos</i>	58
3.4.5.2	<i>Diseño del prototipo</i>	59
3.4.5.3	<i>Enlace de modulos LoRaWAN utilizando el software radio Mobile</i>	60
3.5	Implementar el prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan	62
3.5.1	<i>Requerimientos del Prototipo</i>	63
3.5.1.1	<i>Características Operables</i>	63
3.5.1.2	<i>Características no Operables</i>	64
3.5.1.3	<i>Requerimientos Complementarios</i>	64
3.5.2	<i>Diagrama General del Prototipo de localización de descargas atmosféricas utilizando el método de multiestación</i>	65
3.5.3	<i>Almacenamiento de Datos obtenidos</i>	66
3.5.4	<i>Procesamiento de Datos</i>	68
3.5.4.1	<i>Dashboard</i>	70
3.6	Realizar pruebas del funcionamiento del prototipo de descargas atmosféricas para la localización del rayo	71

CAPITULO IV

4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	77
4.1	Extensión de Cobertura	77
4.1.1	<i>Prototipos Cacha – San Francisco – Riobamba</i>	77
4.2	Localización de Descargas Atmosféricas (rayos)	78
4.3	Localización de descargas atmosféricas	80
4.3.1	<i>Detección 1</i>	81
4.3.2	<i>Detección 2</i>	82
4.3.3	<i>Detección 3</i>	83
4.3.4	<i>Detección 4</i>	84
4.4	Número de descargas atmosféricas por mes	86
4.5	Detección del rayo más cerca y más lejos al cantón Riobamba	88

CAPITULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
5.1	CONCLUSIONES	90
5.2	RECOMENDACIONES	91

BIBLIOGRAFÍA	1
ANEXOS	9

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Aplicación, Modulación Lora y LoraWan	16
Tabla 2-2: Protocolos de comunicación Modelos OSI, TCP/IP y LoraWan.....	17
Tabla 2-3: Características Tecnología LoraWan	25
Tabla 3-1: Ejemplo para el cálculo del método de multiestación.	42
Tabla 3-2: Ubicaciones de los prototipos de localización de descargas atmosféricas.....	49
Tabla 3-3: Pines de conexión entre el módulo Lora-ESP32 y el sensor AS3935	52
Tabla 3-4: Ubicación y altura en donde se va a implementar los prototipos.	60
Tabla 3-5: Ubicación y Altura en donde se va a implementar los prototipos	61
Tabla 4-1: Distancia y hora de detección adquiridas por cada prototipo	80
Tabla 4-2: Ubicación de las cuatro detecciones ocurridas	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Distribución típica de cargas en las nubes y en la tierra	9
Ilustración 2-2: Diferencia entre relámpago, trueno y rayo	9
Ilustración 2-3: Proceso de una descarga atmosférica nube – tierra.....	11
Ilustración 2-4: Método (MDF) localización del rayo	12
Ilustración 2-5: Método de Diferencia en el Tiempo de Llegada (DTOA).....	13
Ilustración 2-6: Ejemplo de un Diagrama Veronio	13
Ilustración 2-7: Ejemplo del método de Multiestación	14
Ilustración 2-8: Método ETMR para ubicar relámpagos.....	15
Ilustración 2-9: Modulación Espectro Ensanchado con respecto a Lora.....	17
Ilustración 2-10: Arquitectura de Red LoraWan.....	24
Ilustración 2-11: Bandas de Funcionamiento Regional LoraWan.....	25
Ilustración 2-12: Seguridad AES para LoRaWAN	27
Ilustración 2-13: Localización de ATDnet en mayo 2013	29
Ilustración 2-14: Detección de Rayos Euclod Europa	30
Ilustración 2-15: Sensor de Detección de rayos Linet.....	30
Ilustración 2-16: Arquitectura LoraWan.....	32
Ilustración 2-17: Arquitectura de Red LoraWan.....	33
Ilustración 2-18: Dispositivo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32	36
Ilustración 2-19: Sensor CJMCU AS3935.....	38
Ilustración 2-20: Apreciación de distancia a detectar	38
Ilustración 2-21: Eficacia de detección por distancia.....	39
Ilustración 3-1: Diagrama de bloques del proceso del prototipo de localización de rayos	41
Ilustración 3-2: Método de Multiestación en Node-Red.....	45
Ilustración 3-3: Comunicación WiFi con el módulo LoRa	47
Ilustración 3-4: Partes de una (URI).....	47
Ilustración 3-5: Distancias de Interconexión entre módulos LoraWan	48
Ilustración 3-6: Área de cobertura para localización del rayo.....	49
Ilustración 3-7: Modulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32.....	50
Ilustración 3-8: Sensor AS3935.....	51
Ilustración 3-9: Diagrama de conexión del prototipo detector de rayos (descargas atmosféricas)	51
Ilustración 3-10: Primera Parte de la programación en Arduino.....	53
Ilustración 3-11: Puertos asignados al sensor AS3935 y determina la Frecuencia de trabajo. ..	54

Ilustración 3-12: Esclarecimiento de complementos de conectividad WiFi.....	55
Ilustración 3-13: Configuración de enlace entre nodos.....	56
Ilustración 3-14: Configuración de Ruido, distorsión y detección del rayo	57
Ilustración 3-15: Conexión entre el dispositivo Lora y el sensor AS3935	58
Ilustración 3-16: Diseño del prototipo de localización de descargas atmosféricas.....	59
Ilustración 3-17: Enlace desde el nodo 1 (cerro Cacha) hacia el nodo máster (Riobamba)	61
Ilustración 3-18: Enlace desde el nodo 2 (cerro San Francisco) hacia el nodo máster (Riobamba)	62
Ilustración 3-19: Diagrama del Prototipo de Localización de descargas atmosféricas.....	65
Ilustración 3-20: Registros almacenados en el servidor Node-Red de todas las Estaciones (nodos)	67
Ilustración 3-21: Registros almacenados en el servidor Node-Red de todas las Estaciones (nodos)	68
Ilustración 3-22: Procesamiento de datos en el servidor Node-Red.....	69
Ilustración 3-23: Procesamiento de datos en el servidor Node-Red.....	70
Ilustración 3-24: Dashboard de detección de descargas atmosféricas	71
Ilustración 3-25: Distancias detectadas por los tres prototipos	72
Ilustración 3-26: Ubicación de la caída del rayo (primer evento evento).....	73
Ilustración 3-27: Distancias detectadas por los tres prototipos (segundo evento)	73
Ilustración 3-28: Ubicación de la caída del primer rayo (segundo evento)	74
Ilustración 3-29: Ubicación de la caída del segundo rayo (segundo evento)	74
Ilustración 3-30: Distancias detectadas por los tres prototipos (tercer evento)	75
Ilustración 3-31: Ubicaciones de la caída de tres rayos (tercer evento evento).....	76
Ilustración 3-32: Historial de todas las descargas atmosféricas	76
Ilustración 4-1: Prototipo instalado en el cerro Cacha	78
Ilustración 4-2: Prototipo instalado en el cerro San Francisco.....	79
Ilustración 4-3: Prototipo Instalado en el domicilio de Riobamba.....	79
Ilustración 4-4: Información de detección adquiridas por los tres prototipos	80
Ilustración 4-5: Ubicación del punto de impacto del rayo dentro de la zona designada (Detección 1).....	81
Ilustración 4-6: Ubicación precisa del punto de impacto del rayo (Detección 1).....	82
Ilustración 4-7: Ubicación del punto de impacto del rayo dentro de la zona designada (Detección 2).....	83
Ilustración 4-8: Ubicación precisa del punto de impacto del rayo (Detección 2).....	83
Ilustración 4-9: Ubicación del punto de impacto del rayo dentro de la zona designada (Detección 3).....	84

Ilustración 4-10: Ubicación precisa del punto de impacto del rayo (Detección 3).....	84
Ilustración 4-11: Ubicación del punto de impacto del rayo dentro de la zona designada (Detección 4).....	85
Ilustración 4-12: Ubicación precisa del punto de impacto del rayo (Detección 4).....	85
Ilustración 4-13: La dirección en la que se desplaza la tormenta eléctrica.....	86
Ilustración 4-14: Grafico de descargas atmosféricas en enero 2024	87
Ilustración 4-15: Histograma de rayos registrados en el mes de enero 2024	87
Ilustración 4-16: Grafico de descargas atmosféricas en febrero 2024.....	88
Ilustración 4-17: Histograma de rayos registrados en el mes de febrero 2024.....	88
Ilustración 4-18: Rayo más cerca y más lejos al cantón Riobamba	89

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Hoja de datos del módulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32

ANEXO B: Hoja de datos del Sensor CJMCU A3935

ANEXO C: Conexión y Configuración de dispositivos

ANEXO D: Pruebas de alcance de los módulos LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32

ANEXO E: Implementación de los Prototipos

ANEXO F: Colocación de los Prototipos en cada uno de los sectores

ANEXO G: Sistema de Detección de Rayos

RESUMEN

La ciudad de Riobamba y sus mediaciones, al estar ubicados en una región de altas tormentas eléctricas en temporadas de lluvia, tiene consecuencias, como interrupciones en los procesos industriales, daños en dispositivos eléctricos, fallos en torres de telecomunicaciones e incluso pérdidas de vidas humanas, por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de titulación fue diseñar e implementar un prototipo para localización de descargas atmosféricas mediante el método de multiestación utilizando tecnología LoRaWAN. El desarrollo del prototipo se basó en datos previamente recopilados en una tesis anterior. Se configuraron los módulos LoRaWAN y los sensores AS3935, posteriormente se colocaron en cajas plásticas impermeables y frascos de vidrio para proteger los componentes electrónicos. El prototipo se ubicó en el cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba, cubriendo un área de 4126 km^2 para la triangulación. El prototipo en Riobamba recopila datos de los otros prototipos y los suyos propios, los cuales se envían al servidor Node-Red para su almacenamiento y procesamiento, con el fin de determinar la ubicación de la caída del rayo. Las pruebas realizadas confirmaron la efectividad del prototipo en la detección de impactos de rayos, proporcionando información sobre fechas, horas y coordenadas geográficas con un margen de error de 1 km. Los impactos registrados ocurrieron en enero y febrero de 2024, con cuatro eventos destacados el 7 de enero durante una fuerte tormenta eléctrica, donde se detectaron las caídas de rayos en línea recta. Estos datos contribuyen al pronóstico de la dirección de futuros rayos. Se concluyó que los prototipos son una herramienta innovadora y accesible para la localización de descargas atmosféricas mediante tecnología LoRaWAN. Esto puede ser beneficioso para empresas eléctricas, de telecomunicaciones, aeropuertos, industrias e incluso para salvar vidas humanas, evitando daños en dispositivos y sistemas electrónicos y reduciendo el impacto financiero en las empresas.

Palabras clave: <PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN LORAWAN>, <PROTOTIPO>, <LOCALIZACIÓN>, <DESCARGA ATMOSFÉRICA>, <MULTIESTACIÓN>, <INTERCONEXIÓN>.

0413-DBRA-UPT-2024



SUMMARY

The city of Riobamba and its surrounding areas, which are prone to high electrical storms during rainy seasons, face various consequences, including interruptions in industrial processes, damage to electrical devices, failures in telecommunications towers, and even loss of human lives. Consequently, this thesis aimed to design and implement a prototype for locating atmospheric discharges using the multi-station method utilizing <LORAWAN COMMUNICATION PROTOCOL> technology. The development of the prototype was based on data previously collected in a prior thesis. The <LORAWAN> modules and AS3935 sensors were configured and housed in waterproof plastic boxes and glass jars to protect the electronic components. The prototype was located in Cerro Cacha, Cerro San Francisco, and Riobamba, covering an area of 4126 square kilometers for triangulation. The prototype in Riobamba collects data from the other prototypes as well as its own, which are then sent to the Node-Red server for storage and processing to determine the location of the lightning strike. Tests confirmed the prototype's effectiveness in detecting lightning impacts, providing information about the dates, times, and geographical coordinates with an error margin of 1 km. Recorded impacts occurred in January and February 2024, with four notable events on January 7 during a severe electrical storm, where the lightning strikes were detected in a straight line. This data contributes to forecasting the direction of future lightning strikes. It was concluded that the prototypes are an innovative and accessible tool for locating atmospheric discharges using <LORAWAN COMMUNICATION PROTOCOL> technology. It can benefit electrical companies, telecommunications, airports, and industries, and even save human lives by preventing damage to devices and electronic systems and reducing the financial impact on businesses.

KEYWORDS: < LORAWAN COMMUNICATION PROTOCOL >, < PROTOTYPE >, < LOCALIZATION >, < ATMOSPHERIC DISCHARGE >, < MULTI-STATION >, < INTERCONNECTION >.



Lic. Maritza Larrea Mg.

0603370784

INTRODUCCIÓN

Los rayos, son fenómenos naturales comunes en la atmosfera terrestre, tienen un impacto significativo en nuestro entorno y en la vida cotidiana. El estudio de estos eventos es crucial debido a las graves consecuencias que pueden derivarse, como interrupciones en los procesos industriales por cortes de energía, fallos en las comunicaciones, incendios e incluso pérdidas de vidas humanas. Ante estos desafíos, diversas industrias han implementado sistemas de detección que incorporan una variedad de dispositivos sensores de rayos, antenas receptoras y software especializado para el análisis de datos. Estos sistemas proporcionan información en tiempo real de manera eficaz y precisa, permitiendo la supervisión constante de estos eventos en una región específica. Esta tecnología juega un papel esencial en la anticipación y reducción de los riesgos asociados con los rayos, asegurando así la seguridad tanto de las personas como de las infraestructuras.

En la actualidad, Ecuador carece de un sistema dedicado a la detección de rayos, a pesar de ser un país propenso a descargas eléctricas intensas que han causado estragos en la industria, provocado incendios e incluso cobrado vidas en varias provincias. La creación de un prototipo basado en el protocolo de comunicación LoraWan para la localización de rayos a través del método de multiestación se presenta como un punto de partida fundamental. Este prototipo tiene como objetivo recopilar datos sobre la cantidad de rayos que impactan en una zona específica durante un período determinado. Mediante el almacenamiento y monitoreo continuo de esta información a lo largo del tiempo, se abre la puerta a la prevención de posibles daños en personas, animales, sistemas eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones. Además, en futuras investigaciones, estos datos podrían utilizarse como referencia para la actualización del mapa isoceráunico de Ecuador, proporcionando así una herramienta valiosa para la gestión del riesgo y la seguridad en el país. Este enfoque innovador no solo promete mitigar los efectos negativos de las descargas eléctricas, sino que también contribuirá significativamente a la protección de la población y los recursos de Ecuador en el futuro.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

En este capítulo se fundamenta el Trabajo de Titulación mediante la presentación de la problemática social e industrial, la justificación teórica y aplicativa del proyecto; y, los objetivos a cumplir a lo largo de su creación.

1.1 Antecedentes

Las descargas eléctricas, también conocidas como rayos, son emisiones eléctricas intensas que tienen lugar en la atmósfera. Este fenómeno surge como resultado de la acumulación de cargas eléctricas contrapuestas entre las nubes, la superficie terrestre o el aire circundante. Cuando la disparidad entre las cargas positivas y negativas alcanza un nivel lo suficientemente elevado, se produce la descarga. En ese momento, la electricidad fluye y se libera, equilibrando temporalmente las cargas. Al liberarse un rayo, se establece un poderoso flujo de corriente desde la nube hacia la tierra o entre nubes, lo que se denomina relámpago. Este flujo de corriente genera un intenso campo electromagnético (Swiss., 2019 págs. 18,19).

Las tormentas eléctricas se consideran fuertes cuando están acompañadas de granizo de por lo menos 2,5 cm de diámetro o ráfagas de viento de 93 km/h, todas las tormentas eléctricas producen rayos, que causan más muertes al año que los tornados y huracanes. Las lluvias intensas de las tormentas eléctricas pueden ocasionar inundaciones súbitas y vientos potentes capaces de dañar viviendas y derribar árboles, postes, lo cual provoca apagones generalizados, arruinar las comunicaciones inalámbricas como antenas de telecomunicación, radio y frecuencias (Mayson, 2022 págs. 3,4).

En el año 2019, se desarrolló un sistema para detectar y localizar rayos utilizando un método de multiestación. Este método implicó el uso de tres sensores Thunder Click que detectan luz visible y campos electromagnéticos en un rango de frecuencias de 500 kHz a 2 MHz, con un alcance de 1 a 40 km. Estos sensores se colocaron en las ciudades de Pondok Betung, Bekasi y Depok en Indonesia, formando así un triángulo. Cada sensor registró el número de eventos, la distancia, el ruido, el estado, la fecha y hora de la caída del rayo. Luego, mediante la intersección de las señales de los sensores, se calcularon las coordenadas exactas del punto de impacto del rayo. Estas coordenadas geográficas se almacenaron en una base de datos MySQL y se mostraron en tiempo real en una interfaz gráfica de usuario desarrollado en MATLAB. Para el primer evento, las

coordenadas exactas fueron -6.521;106.84733, para el segundo evento fueron -6.412;106.6932 y para el tercer evento fueron -6.487;106.7474 (Sulkhii, 2019 pág. 17).

En Ecuador, al estar ubicado en una región tropical, las tormentas eléctricas son eventos meteorológicos relativamente comunes, especialmente durante la temporada de lluvias. Estas tormentas pueden estar asociadas con frentes fríos, sistemas de baja presión, humedad atmosférica y otros factores meteorológicos. Las tormentas eléctricas son más comunes durante la temporada de lluvias, que generalmente ocurre entre los meses de octubre a mayo. Durante este período, se produce un aumento en la humedad y las condiciones atmosféricas favorables para el desarrollo de tormentas (Barros, 2010 pág. 6).

Recientemente, se han realizado esfuerzos para actualizar el mapa isoceráunico en Ecuador, destacando el trabajo realizado por Verdugo en 2017. En este estudio, se establecieron las especificaciones técnicas necesarias para una red de detección de rayos en el país, con el objetivo de identificar las provincias con mayor actividad de tormentas eléctricas. Se evaluaron varios sensores disponibles en el mercado, con un criterio de eficiencia superior al 90%, conforme a la norma internacional IEC 62793. La autora se enfocó principalmente en dos sensores: el BTD-300, capaz de detectar campos eléctricos en un rango de hasta 83 km, y el sensor LS7002, que detecta campos electromagnéticos con un alcance máximo de 350 km. Ambos sensores operan en un rango de frecuencias de 3-30 kHz. Los resultados obtenidos indicaron que era recomendable implementar la red de detectores en ubicaciones estratégicas del país utilizando el sensor BTD-300 debido a su rendimiento y costo, con un presupuesto de \$98,400. Sin embargo, este costo representa una inversión significativa. Además, se sugirió colaborar con la red de detectores existente en la frontera con Colombia para reducir el número de sensores necesarios y facilitar el intercambio de información. A pesar de estas recomendaciones, el proyecto no ha sido implementado hasta el momento, lo que impide evaluar el alcance real y la efectividad de la red de detección de descargas atmosféricas (Verdugo, 2017 págs. 27-63).

En la actualidad, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) carece de registros digitales propios sobre descargas atmosféricas. El mapa de actividad de rayos, concebido hace más de 25 años por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) ya extinto, no se ajusta a la realidad debido a las cambiantes condiciones climáticas en Ecuador en años recientes. Aunque la más reciente actualización se efectuó en 2020, se encuentra restringida únicamente a datos del satélite LIS y abarca exclusivamente la ciudad de Quito (Flores, 2021 pág. 35).

LINET es una empresa alemana que ha desarrollado un sistema de red de detección de rayos, producido en Múnich, que ofrece a los clientes la opción de adquirir y operar su propio sistema de localización de rayos. Este sistema es independiente, altamente preciso y confiable. LINET proporciona soluciones en diversos sectores, como servicios meteorológicos, aviación, aseguradoras, compañías proveedoras de energía, telecomunicaciones, entre otros. La empresa se destaca por su alta precisión, con una desviación media de aproximadamente 75 metros. Esta precisión se debe a la amplia experiencia de LINET en el campo y al costo elevado de sus dispositivos para el sistema de red (Lightning Detected Nowcast, 2023 pág. 1).

La dispersión de estos sistemas de detección y ubicación de descargas atmosféricas salvará a personas y animales, además, los dispositivos electrónicos se pueden procesar utilizando advertencias recibidas por adelantado. Finalmente, en Ecuador el problema persiste, porque el país no tiene sensores de carga atmosféricos, por lo que es imposible controlar, registrar datos, generar investigación y tomar decisiones. Es obvio que, sin estos sensores, no hay ningún sistema en Ecuador para detectar descargas atmosféricas, lo que protege a los agricultores, ganaderos y animales, mucho menos el análisis de la interferencia en los sistemas de telecomunicaciones de tierra y aviación, protegiendo en sistemas de transmisión eléctrica, etc (Aecernnr, 2021 págs. 32,33).

1.2 Planificación del Problema

¿Cómo diseñar e implementar un prototipo para localización de descargas atmosféricas mediante el método de multiestación utilizando tecnología LoraWan?

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Teórica

El sensor Thunder Click es un sensor que es capaz de detectar descargas atmosféricas o más llamados rayos que utiliza diferentes técnicas para detectar y analizar las características de los rayos. Puede medir la intensidad y la frecuencia de los impulsos electromagnéticos generados por los rayos, lo que permite determinar la distancia y la dirección aproximada de la tormenta eléctrica. Este tipo de sensor es útil en aplicaciones que requieren monitoreo y alerta temprana de tormentas eléctricas. Puede ser utilizado en estaciones meteorológicas, sistemas de detección de rayos, sistemas de alerta de tormentas y en la investigación científica relacionada con fenómenos atmosféricos. El módulo sensor Thunder Click suele ofrecer interfaces de conexión para facilitar la integración con otros sistemas. Puede contar con puertos de comunicación como I2C, UART,

SPI u otros protocolos de comunicación. Es capaz de detectar descargas atmosféricas y obtener del posible punto de caída de este en un rango de 1 km a 40 km con un voltaje de alimentación de 3,3V o 5V. Está compuesto por una antena de bobina MA5532 que trabaja en un rango de 500 kHz a 2 MHz que detecta las ondas electromagnéticas de luz emitida por el rayo y un sensor IC AS3935 que procesa estos datos (Thunder, 2022 págs. 6-8).

Sensor Thunder Click puede ser aprovechado de sus capacidades de conectividad y procesamiento de señales. Este sensor es diseñado para detectar campos electromagnéticos generados por los rayos. Puede implementar algoritmos de detección de rayos para identificar patrones y distinguir las señales de rayos electromagnéticos. enviar los datos de detección de rayos (Benigno J, 2020 pág. 11).

El módulo Wifi TTGO T-Beam ESP32 LoraWan 915 MHz es una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo costo y de bajo consumo, con transmisión de bajo volumen de datos y para grandes distancias bidireccionales. Su comunicación es segura, puede dar cobertura de 10 a 20 kilómetros a la redonda, no dispone de limitación al momento de enviar o recibir información de datos. (Moncho T, 2022) LoraWan es un protocolo de comunicación de red de a multipunto es decir un protocolo de capa de control de acceso medio con algunos componentes de red, mejora la duración de la batería y la calidad del servicio para los nodos de Lora. En este tipo de tecnología es importante la transferencia de datos que son hasta 255 bytes con una frecuencia de trabajo en Europa a 868 MHz en Asia a 433 MHz y en América de 915 MHz. Este tipo de tecnología se la puede usar en lugares de poca cobertura como en sitios agrícolas y ganaderos. Se compone de Gateway (se encargan en recibir y enviar datos a los nodos) y Nodos (dispositivos finales q envían y reciben datos hacia el Gateway). Para recolectar los datos obtenidos por cada sensor el módulo Wifi TTGO T-Beam ESP32 LoraWan 915Mhz cumple con la funcionalidad de conexión Wifi-Bluetooth con TCP/IP y los requerimientos y características necesarias para el procesamiento y el posterior envío de datos al computador. Permitiendo el entorno de desarrollo en IDE Arduino, que es un entorno de código abierto para controlar codificación asociando descargas e instalaciones de librerías según se requiera. Por lo que la obtención del servidor nos dará lo necesario para el diseño ideal para el procesamiento de datos (Catsensors, 2023 págs. 4-6).

El método de triangulación o también conocido como método de multiestación se basa en la instalación de varias estaciones de monitoreo distribuidas geográficamente triangular es decir al menos tres sensores se utilizan en conjunto para formar un triángulo y cada sensor mide la distancia desde el punto de impacto hasta su ubicación posteriormente se trazan círculos

utilizando las distancias obtenidas de los tres sensores con el punto donde estos se cruzan entre sí para detectar y localizar las descargas atmosféricas, como los rayos como se muestran en la figura 1. Cada estación recoge datos sobre la llegada de la onda electromagnética generada por el rayo y utiliza estas mediciones para determinar la ubicación aproximada de la caída del rayo (Sulki. Sastra K, 2019 pág. 21).

1.3.2 *Justificación Aplicativa*

En el proyecto de titulación se va a diseñar e implementar un prototipo para localización de descargas atmosféricas mediante el método de multiestación utilizando tecnología LoraWan, con el propósito de evitar eventuales perjuicios en animales, seres humanos, sistemas eléctricos y de telecomunicaciones. En primer lugar, se estudiará el método de localización de descargas atmosféricas para la implementación del prototipo. Posteriormente, se analizará el protocolo de comunicación que se utilizarán en el prototipo. Seguidamente, se diseñará e implementará el prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan que son dispositivos para conexiones inalámbricas de bajo consumo con entornos de programación. Finalmente se realizarán pruebas del funcionamiento del prototipo de descargas atmosféricas para la localización del rayo.

1.4 *Objetivos*

1.4.1 *Objetivo General*

Diseñar e implementar un prototipo para localización de descargas atmosféricas mediante el método de multiestación utilizando tecnología LoraWan.

1.4.2 *Objetivo Específicos*

- Estudiar el método de localización de descargas atmosféricas para la implementación del prototipo.
- Analizar el protocolo de comunicación LoraWan para la implementación del prototipo de localización de descargas atmosféricas.
- Diseñar el prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan.

- Implementar el prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan.
- Realizar pruebas del funcionamiento del prototipo de descargas atmosféricas para la localización del rayo.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán los fundamentos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento del sistema de localización de descargas atmosféricas. En la Sección 2.1 se revisa los conceptos de las descargas atmosféricas (rayos) y las fases para la creación de una tormenta eléctrica. Luego, en la Sección 2.2 se estudian los diferentes métodos de localización de rayos con el fin de seleccionar el más conveniente para el proyecto. Después, en la Sección 2.3 se analiza el protocolo de comunicación LoraWan. En la Sección 2.4 se estudia las tecnologías de detección y localización de rayos por parte de industrias a nivel mundial. Posteriormente, en la Sección 2.5 se examinan los conceptos teóricos de la arquitectura LoraWan. Finalmente, en la Sección 2.6 se analiza una plataforma dashboard que almacene y procese la información. Finalmente, en la Sección 2.7 se dan a conocer las características de los dispositivos electrónicos.

2.1 Descargas Atmosféricas

La descarga eléctrica atmosférica es un fenómeno natural que ocurre con mayor frecuencia en ciertas épocas del año y varía en cuanto a su tipo e intensidad. Se produce durante una tormenta y se caracteriza por una intensa liberación de electricidad, acompañada de un destello luminoso (relámpago) y el sonido del trueno. Los rayos pueden formarse debido a diversas condiciones atmosféricas, como el viento, la presión y la humedad, así como por efectos del viento solar o la acumulación de partículas cargadas del sol. Se cree que el hielo desempeña un papel fundamental en la separación de las cargas eléctricas positivas y negativas dentro de la nube (Verdugo, 2023 págs. 16-18).



Ilustración 2-1: Distribución típica de cargas en las nubes y en la tierra

Fuente: (Granizo, 2019 pág. 19)

El rayo ocurre cuando se liberan intensas corrientes eléctricas en la atmósfera a distancias que pueden alcanzar varios kilómetros. Este fenómeno inicia con la separación de cargas positivas y negativas dentro de una nube. Durante este proceso, la separación de carga induce la distribución de carga positiva en la parte superior de la nube, mientras que la carga negativa se ubica en la parte inferior. La atracción gravitacional de la Tierra hacia la carga negativa en la parte inferior de la nube desencadena la liberación de carga, dando lugar a la formación de un rayo. Los rayos liberan una gran corriente eléctrica en un corto período de tiempo. Se estima que un rayo libera una corriente eléctrica de 80.000 A en un solo golpe, mientras que la potencia promedio total liberada simultáneamente por un rayo en un solo golpe es de alrededor de 106 W. Esta liberación de energía se produce en objetos con un período de tiempo corto, es decir, 0 (Wijaya, 2019 pág. 1).



Ilustración 2-2: Diferencia entre relámpago, trueno y rayo

Fuente: (Agustino, 2021 pág. 2)

El enfoque principal de este Proyecto de Titulación es la identificación de las descargas atmosféricas entre nubes y la tierra, ya que tienen una mayor probabilidad de ocurrir en las áreas de investigación y afectan la actividad humana. De manera global, un rayo se compone de un destello luminoso (relámpago) y el sonido asociado (trueno), como se ilustra en la Ilustración 2-2.

Trueno: Es el sonido producido por la expansión rápida del aire caliente que rodea un rayo durante una tormenta eléctrica. Cuando un rayo atraviesa el aire, calienta el aire circundante a temperaturas muy altas, generando una onda de choque. Esta onda de choque es lo que escuchamos como trueno. La luz del rayo y el sonido del trueno ocurren simultáneamente, pero debido a que la luz viaja más rápido que el sonido, vemos el destello del relámpago antes de escuchar el trueno. La distancia entre el observador y la fuente del rayo se puede estimar contando los segundos entre ver el relámpago y escuchar el trueno, ya que el sonido viaja aproximadamente a 343 metros por segundo en el aire (Cana, 2021 pág. 1).

Relámpago: Es el resplandor que produce la descarga eléctrica en forma de luz y, a diferencia del rayo, nunca tiene contacto con la tierra. Este destello viaja a la velocidad de la luz (300 mil km/s). Dado que es tan rápido, no se puede hacer un cálculo de la distancia a la que está ocurriendo esta descarga (Laroj, 2004 pág. 9).

En la fase de la descarga, el rayo descendente se desplaza a una velocidad de 1×10^{-8} o 2×10^{-8} m/seg, con tiempo aproximado de 100 μ s. Las estadísticas de observaciones internacionales muestran que más del 50% de los rayos tienen 2 y 5 descargas individuales, con duración de 20 a 50 milisegundos (ms) unos de otros, pero se establecen 3 descargas en promedio con una duración de 0.003 ms. Sin embargo, con equipo moderno de la actualidad se han observado rayos con 40 descargas sucesivas. Finalmente, el rayo se desplaza en el aire buscando siempre la mayor conductividad y mínima resistencia o regiones de mayor humedad relativa en la atmósfera. En la Ilustración 2-3 se muestra el proceso de una descarga de nube a tierra y los tiempos asociados al desplazamiento de esta (Tomas, 2004 págs. 11,12).

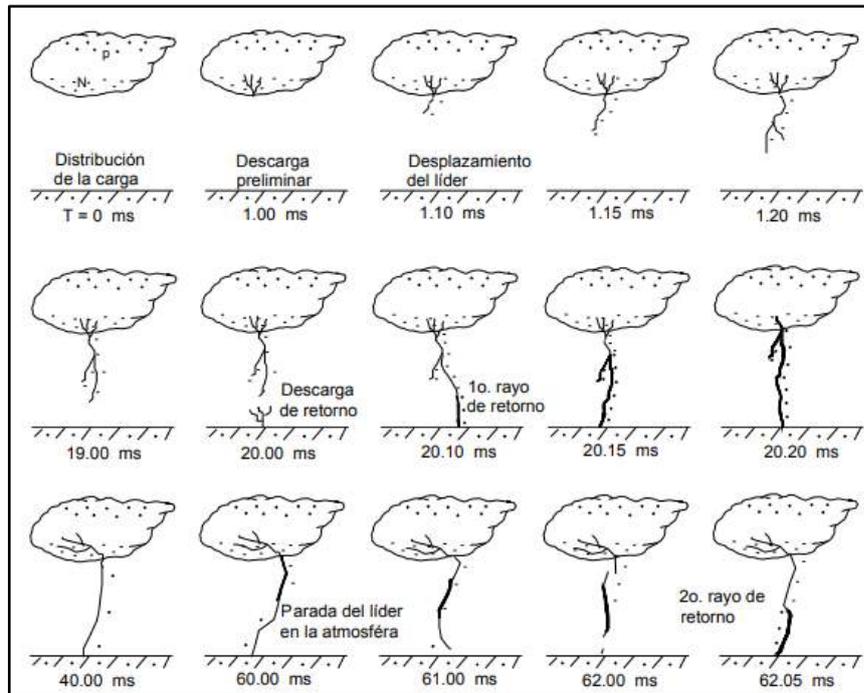


Ilustración 2-3: Proceso de una descarga atmosférica nube – tierra

Fuente: (Lerad, 2004 pág. 12)

2.2 Método de Localización

Existen varios métodos para localizar descargas atmosféricas, estos métodos son utilizados para monitorear tormentas eléctricas y prever su impacto. La identificación de la localización de descargas eléctricas es crucial para el sistema propuesto. Por este motivo, se presenta una explicación detallada sobre el funcionamiento de diversos métodos y técnicas disponibles para determinar los puntos de impacto de los rayos.

2.2.1 *Magnetic Direction Finding (MDF)*

El "Magnetic Direction Finding" (MDF) es una técnica utilizada para determinar la dirección de una señal electromagnética, como la proveniente de una fuente de radio o una emisión magnética. En el contexto de la localización de descargas atmosféricas, el MDF puede referirse a la capacidad de medir la dirección de las perturbaciones en el campo magnético causadas por las corrientes eléctricas asociadas con los rayos.

En sistemas de MDF, generalmente se emplean antenas direccionales que permiten a los operadores o a los equipos automáticos determinar la dirección desde la cual llega la señal. Estas antenas pueden ser rotadas para encontrar la posición óptima que maximice la intensidad de la

señal recibida. Al combinar lecturas de múltiples antenas o utilizando una matriz de antenas, se puede triangular la ubicación aproximada de la fuente de la señal.

En el contexto específico de descargas atmosféricas, la aplicación del MDF podría implicar la detección y localización de las corrientes magnéticas asociadas con los rayos para estimar la posición de la descarga. Este enfoque, junto con otros métodos, contribuye a la monitorización y estudio de tormentas eléctricas (Sonnadara, y otros, 2001 págs. 3-5).

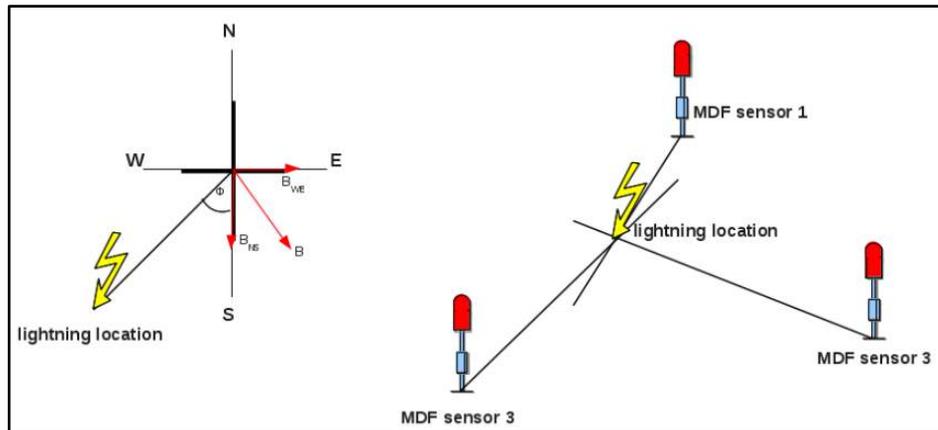


Ilustración 2-4: Método (MDF) localización del rayo

Fuente: (Vidmar, 2001 pág. 2)

2.2.2 *Diference in time on Arrival (DTOA)*

También llamado, Diferencia en el Tiempo de Llegada, es un método de localización que se basa en medir la diferencia en el tiempo en que una señal llega a diferentes receptores. Este enfoque se utiliza comúnmente en sistemas de posicionamiento y rastreo. En el contexto de descargas atmosféricas, la técnica de DTOA se puede aplicar para determinar la ubicación de un rayo midiendo el tiempo que tarda la onda electromagnética asociada en llegar a varios puntos receptores. Al tener múltiples estaciones receptoras distribuidas en diferentes ubicaciones, la diferencia en el tiempo de llegada de la señal a cada estación se utiliza para calcular la ubicación tridimensional de la descarga atmosférica (Revi, 2022 págs. 3-5).

La triangulación mediante DTOA es efectiva porque la velocidad de propagación de la onda electromagnética es constante en el aire. Por lo tanto, al conocer la velocidad de la señal y las diferencias en los tiempos de llegada, se puede calcular la distancia entre la fuente de la señal y cada receptor. La intersección de estas distancias proporciona la ubicación estimada de la descarga atmosférica. Este método es comúnmente utilizado en sistemas de localización de

tormentas eléctricas y en redes de monitoreo de rayos para proporcionar información precisa sobre la ubicación de las descargas atmosféricas (Anritsu, 2022 pág. 3).

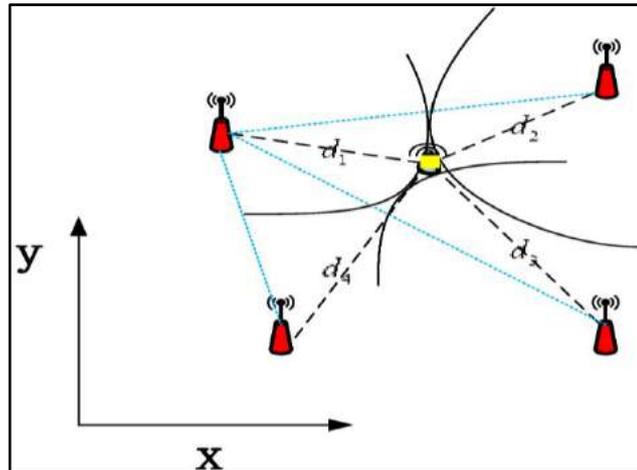


Ilustración 2-5: Método de Diferencia en el Tiempo de llegada (DTOA)

Fuente: (Philos, 2020)

2.2.3 Diagrama de Veronoi

Un diagrama de Voronoi, también conocido como teselación de Voronoi o polígonos de Thiessen, es una partición de un plano en regiones, donde cada región está asociada a un conjunto de puntos cercanos a un punto de origen específico $\{p_1, \dots, p_n\}$. Estas regiones son polígonos que contienen todos los puntos más cercanos a un punto de la red en particular. Los límites entre los polígonos de Voronoi se definen como las líneas medias entre los puntos vecinos. Estas líneas son perpendiculares a las líneas conectando los puntos de origen (García Bernal, 2017 págs. 8-11).

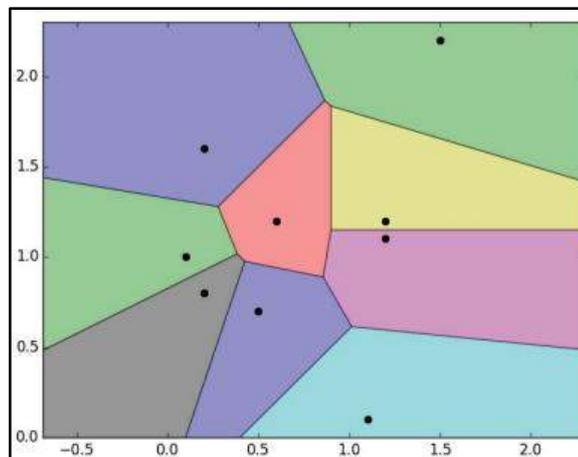


Ilustración 2-6: Ejemplo de un Diagrama Veronoi

Fuente: (Bernal, 2017 pág. 3)

2.2.4 Multiestación

El principio de funcionamiento del sistema de sensores multiestación para obtener puntos de coordenadas de rayos es similar al método gráfico de líneas gruesas de tres círculos para determinar el epicentro del terremoto. El método gráfico de líneas gruesas de tres círculos utiliza datos de llegada de ondas P y S de varias estaciones de registro, con al menos tres estaciones de registro. Por ejemplo, tres estaciones de registro S1, S2 y S3, cada estación de registro se hace como el centro del círculo con el radio de r_1 , r_2 y r_3 . La coordenada E del epicentro es la intersección de las líneas gruesas de los tres círculos que se muestran en la Ilustración 2-7 (Sulkhi, 2019 págs. 20-25).

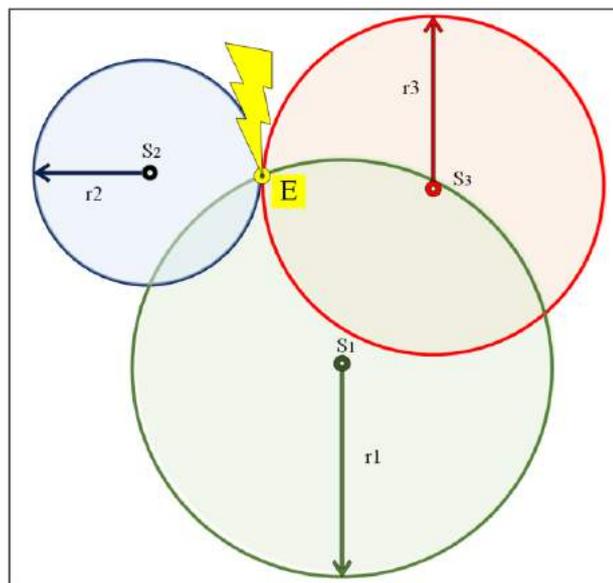


Ilustración 2-7: Ejemplo del método de Multiestación

Fuente: (Guaman, 2023 pág. 9)

La aplicación del método gráfico de punto central de tres círculos se usa para determinar la ubicación de los puntos de impacto de un rayo, cuando ocurre un impacto de rayo dentro del rango del área del sistema del sensor multiestación, entonces cada sensor Thunder Click registra el radio de impacto de un rayo. De las tres lecturas de radio del sensor, se obtiene un punto de intersección de los tres círculos como la ubicación del rayo (Sulkhi, 2019 pág. 2).

2.2.5 Electromagnetic Time Reversal

Electromagnetic Time Reversal (EMTR) o Inversión del tiempo electromagnético puede emplearse para determinar la posición de las fuentes de radiación electromagnética asociadas a

los relámpagos. Este método se fundamenta en la captura simultánea y sincronizada de las formas de onda del campo eléctrico o magnético por múltiples sensores. Estos registros de formas de onda se envían a un servidor central, que realiza una inversión temporal y facilita la propagación de las versiones invertidas hacia el dominio de ubicación mediante simulación numérica. Los campos que se propagan se combinan en fase en la ubicación del relámpago, generando una interferencia constructiva máxima (Wiley, y otros, 2018 pág. 26).

En la Ilustración 2-8, la imagen (a) muestra la disposición de cuatro sensores de campo magnético de bucle cruzado. En la imagen (b), se ilustra la ocurrencia de un rayo y cómo la radiación impulsiva de uno de sus impactos de retorno alcanza los sensores. En la imagen (c), se observa cómo las versiones invertidas en el tiempo de las formas de onda del campo se propagan hacia atrás en el dominio de ubicación mediante simulación numérica. Este proceso tiene como objetivo encontrar el punto donde la interferencia constructiva alcanza su máximo (Rubinster, 2017 pág. 192).

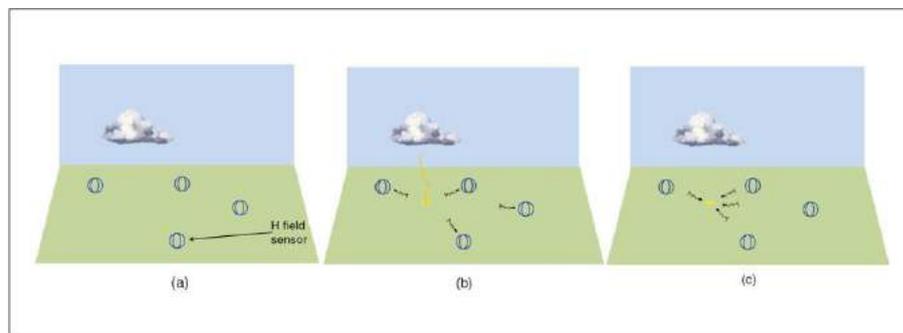


Ilustración 2-8: Método ETMR para ubicar relámpagos

Fuente: (Karami, 2014 pág. 193)

2.3 Protocolo de comunicación LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es un protocolo de comunicación diseñado para la transmisión de datos de baja potencia y de larga distancia entre dispositivos IoT (Internet de las cosas) y una red central. Este protocolo es parte de la tecnología LoRa (Long Range), que se basa en la modulación de radio de baja potencia para permitir la comunicación inalámbrica en distancias más extensas de lo que sería posible con tecnologías tradicionales. LoRa utiliza una modulación de espectro ensanchado para transmitir datos. Esto permite una mayor distancia de transmisión y una mejor penetración a través de obstáculos en comparación con las tecnologías de corto alcance. Sigue una topología de red de estrella invertida, donde múltiples dispositivos finales (nodos) se comunican con una o más, estas transfieren los datos a un servidor central. Esto

facilita la gestión y la escalabilidad de la red, existen algunas clases de dispositivos LoRa, detalladas a continuación (Intrumentation, 2022 págs. 2-5):

- **Clase A:** Los dispositivos de Clase A son los más simples y de menor consumo energético. Envían datos al servidor en intervalos regulares, pero solo escuchan para recibir datos después de enviar un paquete.
- **Clase B:** Los dispositivos de Clase B se sincronizan a la red utilizando guías periódicas y ping programados, permitiendo que se envíe datos con latencia determinística.
- **Clase C:** Los dispositivos de Clase C están casi siempre escuchando y son capaces de recibir datos en cualquier momento, excepto cuando están transmitiendo, reducen la latencia manteniendo el receptor del dispositivo final abierto.

LoRaWAN es el protocolo que dicta como se envían y reciben los paquetes de datos de sensores u otros componentes de la red y la forma de tratar esos paquetes (Frigman, 2022 pág. 81).

Tabla 2-1: Aplicación, Modulación Lora y LoraWan

	APLICACION			
LoraWan	LoraWan MAC			Capa MAC
	Dispositivos MAC			
	Clase A	Clase B	Clase C	
Lora	Modulación Lora			Capa física
	Banda Regional (Mhz)			
	EU 868	US 915	AS 433	

Realizado por: Jeison O, 2024

LoRaWAN opera en diferentes frecuencias de radio, que varían según la región geográfica para evitar interferencias y cumplir con las regulaciones locales como se presenta en la Tabla 2-1. Las bandas de frecuencia típicas para LoraWan incluyen 868 MHz en Europa, 915 MHz en América del Norte, y 923 MHz en Asia (Keller, 2022 pág. 4).

LoRa también trabaja con SSM (Modulación de Espectro Ensanchado), que es una técnica de modulación que se utiliza en comunicaciones inalámbricas para mejorar la resistencia a interferencias y proporcionar mayor seguridad y privacidad en la transmisión de datos, lo ideal es distribuir la señal de datos a través de un ancho de banda mucho mayor de lo necesario para la transmisión básica (Poveda Zafra, 2003 pág. 72), como se muestra en la Ilustración 2-9. SSM codifica la señal base con una secuencia de alta frecuencia, que deliberadamente propaga la señal base a

través de un mayor ancho de banda, reduce el consumo de energía y aumenta la resistencia a las interferencias electromagnéticas (Pickering, 2017 pág. 3).

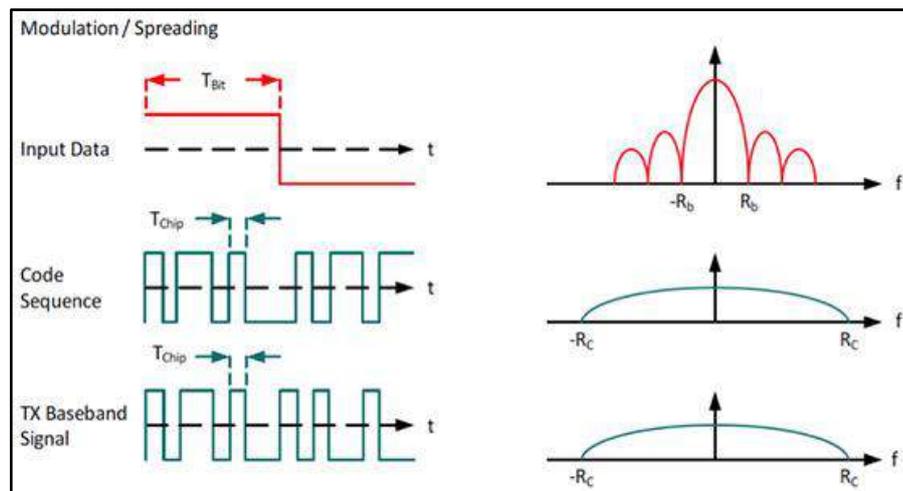


Ilustración 2-9: Modulación Espectro Ensanchado con respecto a Lora

Realizado por: (Pickering, 2017 pág. 4)

Un sistema de espectro ensanchado multiplica los datos de entrada en una secuencia de código mucho más rápida que propaga la señal de ancho de banda. Para un ancho de banda disponible, una mayor difusión factor reduce la tasa de bits, y también reduce la duración de la batería incrementando el tiempo de transmisión (Pickering, 2017 pág. 6).

Por otro lado, para identificar el protocolo de comunicación LoRaWAN, es fundamental dividir en capas según el modelo OSI y TCP/IP, ya que cada una desempeña una función. A continuación, se muestra la siguiente Tabla 2-2:

Tabla 2-2: Protocolos de comunicación Modelos OSI, TCP/IP y LoraWan.

MODELO OSI	MODELO TCP/IP	PROTOCOLO LORAWAN
Capa de Aplicación	Capa de Aplicación	Capa de Aplicación CoAP, MQTT, HTTP, XMPP
Capa de Presentación	Capa de Presentación	
Capa de Sesión	Capa de Sesión	
Capa de Transporte	Capa de Transporte UDP, TLS y TCP	Capa de Red IPv4, TCP, SPI
Capa de Red	Internet IPv4/IPv6	

Enlace de Datos	Acceso a Red	Capa Física o MAC Wi-Fi, Bluetooth
Capa Física	Capa Física Wi-Fi, Bluetooth	

Realizado por: Jeison O, 2024

2.3.1 *Capa de Aplicación*

En la Tabla 2-2, se considera la capa de aplicación formado por CoAP, MQTT, HTTP, XMPP, SNMP que son los principales protocolos de comunicación que confirma el módulo LoRa, a continuación, se los describe.

2.3.1.1 *Constrained Application Protocol (CoAP)*

CoAP, que significa "Constrained Application Protocol" (Protocolo de Aplicación Restringida), es un protocolo de aplicación diseñado para la comunicación entre dispositivos en redes de Internet de las cosas. Fue desarrollado para ser eficiente en términos de ancho de banda y recursos, ya que se espera que los dispositivos tengan limitaciones en cuanto a energía, capacidad de procesamiento y memoria, sus características a continuación (Chen, 2017 pág. 2):

- Está diseñado para ser liviano y eficiente, lo que lo hace adecuado para dispositivos con recursos limitados.
- Opera sobre el Protocolo de Datagrama de Usuario (UDP), lo que ayuda a reducir la sobrecarga y facilita la implementación en dispositivos con recursos limitados.
- Permite la comunicación unidireccional y bidireccional entre dispositivos y también incluye mecanismos para descubrir recursos disponibles en la red.
- sigue los principios de la arquitectura REST (Transferencia de Estado Representacional), lo que facilita su integración con aplicaciones web y servicios RESTful.
- utiliza métodos de solicitud similares a HTTP, como GET, POST, PUT y DELETE, lo que facilita la integración con aplicaciones web y servicios existentes.

2.3.1.2 *Protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)*

Es un protocolo de mensajería ligero y de código abierto diseñado para la comunicación eficiente entre dispositivos en redes con ancho de banda limitado o conexiones inestables, dispone de comunicación M2M (Machine to Machine) de tipo de mensaje, está basado en el grupo TCP/IP,

fue desarrollado por IBM, algunas de sus propiedades se los muestran a continuación (Llamas, 2019 pág. 71):

- Es un protocolo de comunicación ligero y simple, diseñado para minimizar el uso de recursos y ser eficiente en términos de ancho de banda.
- Opera bajo el modelo de publicación/suscripción, donde los dispositivos pueden publicar mensajes específicos y suscribirse a temas de interés. Esto facilita la comunicación uno a muchos y muchos a uno.
- Permite que los mensajes sean retenidos en el servidor y entregados de nuevo cuando se conectan.
- Puede ser implementado con capas de seguridad adicionales, como el uso de TLS/SSL para cifrado.

2.3.1.3 *Protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol)*

Es un protocolo de comunicación utilizado para la transferencia de información en la World Wide Web. Fue desarrollado para facilitar la comunicación entre navegadores web y servidores web. HTTP es un protocolo sin estado, lo que significa que cada solicitud del cliente al servidor es independiente y no lleva consigo información sobre el estado de las solicitudes anteriores, un poco más a detalle a continuación (Electronics, 2023 págs. 8-10).

- HTTP sigue un modelo cliente-servidor, donde un cliente (generalmente un navegador web) realiza solicitudes a un servidor para obtener recursos, y el servidor responde con esos recursos.
- Cada solicitud del cliente se trata de forma independiente, sin conocimiento de las solicitudes anteriores. Esta característica hace que las interacciones sean independientes y más sencillas.
- Las transacciones HTTP están basadas en texto, lo que significa que las solicitudes y respuestas están formateadas en un formato legible por humanos. Esto facilita la depuración y la comprensión, pero también puede tener una sobrecarga de ancho de banda.
- HTTP utiliza diferentes métodos de solicitud, como GET (obtener recursos), POST (enviar datos al servidor), PUT (actualizar un recurso en el servidor), DELETE (eliminar un recurso en el servidor), entre otros.

2.3.2 *Capa de Transporte*

En la capa de transporte se encuentra fundamentado en la Tabla 2-2, en la cual está formado por los protocolos de comunicación principales UDP, TLS y TCP, que se tomará en cuenta en lo siguiente.

2.3.2.1 *Protocolo UDP (User Datagram Protocol)*

Es un protocolo de comunicación de la capa de transporte en el modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnection). UDP es un protocolo sin conexión y orientado a la no fiabilidad, lo que significa que no establece una conexión antes de enviar datos y no garantiza la entrega de los datos, se detallan algunas características a continuación (Buston, 2022 págs. 6-7):

- UDP no establece una conexión antes de enviar datos. Cada datagrama UDP es independiente, y no hay seguimiento de conexiones o estados.
- UDP es un protocolo liviano en comparación con TCP. No tiene el sobre costo asociado con el seguimiento de estados de conexión y la retransmisión de paquetes perdidos.
- El encabezado de un datagrama UDP es simple, lo que ayuda a minimizar la sobrecarga en la red.
- UDP permite la transmisión de datos a múltiples destinatarios utilizando broadcast o multicast. Esto es útil en situaciones donde se necesitan transmisiones a múltiples destinatarios simultáneamente.

2.3.2.2 *Protocolo TLS (Transport Layer Security)*

TLS o Seguridad de la Capa de Transporte, es un protocolo de seguridad diseñado para proporcionar privacidad y seguridad en la comunicación a través de una red, como Internet. TLS es la evolución del protocolo SSL (Secure Sockets Layer) y se utiliza comúnmente para cifrar la comunicación entre clientes y servidores web, proporcionando una capa adicional de seguridad, las cuales se las describe en lo siguiente (Vargas, 2022 págs. 16-18).

- TLS cifra los datos transmitidos entre un cliente y un servidor para protegerlos contra la interceptación no autorizada. Utiliza algoritmos criptográficos para asegurar la confidencialidad de la información.

- TLS permite la autenticación mutua entre el cliente y el servidor. Esto significa que tanto el cliente como el servidor pueden verificar la identidad del otro, proporcionando una capa adicional de seguridad.
- TLS garantiza la integridad de los datos transmitidos. Utiliza funciones hash criptográficas para asegurarse de que los datos no hayan sido modificados durante la transmisión.

2.3.2.3 *Protocolo TCP (Transmission Control Protocol)*

TCP, que significa Protocolo de Control de Transmisión, es un protocolo de la capa de transporte en el modelo de referencia OSI, TCP proporciona una comunicación confiable y orientada a la conexión entre dispositivos en una red. Su función principal es asegurar la entrega ordenada y sin errores de datos entre aplicaciones en dispositivos finales, como computadoras, servidores y otros dispositivos de red, sus propiedades son (Vargas, 2023 págs. 13-14):

- TCP establece una conexión antes de iniciar la transferencia de datos. Esta conexión es bidireccional y persistente durante la duración de la comunicación.
- TCP garantiza la entrega confiable de datos. Utiliza un mecanismo de confirmación para asegurarse de que los datos lleguen correctamente al destino. Si un segmento de datos no se confirma, TCP retransmite esos datos.
- TCP realiza el control de flujo para evitar la congestión en la red. Los dispositivos pueden negociar y ajustar la cantidad de datos que se envían antes de recibir una confirmación, evitando así la saturación de la red.

2.3.3 *Capa de Red o Internet*

Esta capa se la toma en cuenta en la Tabla 2-2, la cual está formado por el principal protocolo importante para la comunicación IPv4/IPv6, que se detalla a continuación.

2.3.3.1 *IPv4/IPv6*

Protocolo de Internet versión 4 (IPv4) utiliza direcciones IP de 32 bits. Esto permite un total de aproximadamente 4.3 mil millones de direcciones IP únicas, estas direcciones se representan en notación decimal puntual, por ejemplo: 192.168.1.1. Cada octeto de la dirección está representado en decimal y separado por puntos, el principal problema de IPv4 es la escasez de direcciones IP debido al rápido crecimiento de la Internet y la proliferación de dispositivos conectados.

Protocolo de Internet versión 6 (IPv6) Utiliza direcciones IP de 128 bits, lo que proporciona un espacio de direcciones virtualmente ilimitado. La cantidad teórica de direcciones IPv6 es enorme, lo que aborda el problema de agotamiento de direcciones de IPv4, se representan en notación hexadecimal y están separadas por dos puntos, por ejemplo: 2001:0db8:85a3:0000:0000:8a2e:0370:7334. Incluye mejoras en la seguridad y la configuración automática de direcciones, lo que facilita la administración de la red y la seguridad, aunque IPv6 ha estado disponible durante muchos años, su adopción ha sido gradual. Se espera que IPv6 se convierta en la opción predominante a medida que las direcciones IPv4 se vuelven más escasas (Networks, 2022 págs. 12-16).

2.3.4 Capa Física

Dentro de la capa física tenemos en cuenta en la Tabla 2-2, que se encuentra considerado dos protocolos esenciales de comunicación que son Wi-Fi y Bluetooth, que se detallara a continuación:

2.3.4.1 Wifi (Wireless Fidelity)

Wi-Fi, que significa "Wireless Fidelity," es una tecnología de comunicación inalámbrica que permite la conexión de dispositivos electrónicos a una red local (LAN) sin la necesidad de cables físicos. Utiliza ondas de radio para la transmisión de datos, permitiendo la conectividad y el acceso a Internet de manera inalámbrica, Algunas características clave de Wi-Fi son las siguientes (Suptor, 2023 pág. 196):

- Wi-Fi elimina la necesidad de cables para la conexión de dispositivos, permitiendo la comunicación inalámbrica entre computadoras, teléfonos inteligentes, tabletas, impresoras y otros dispositivos electrónicos.
- Wi-Fi opera según estándares establecidos por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Los estándares más comunes incluyen 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac y 802.11ax, cada uno mejorando la velocidad, el alcance y otras características de la tecnología.
- Wi-Fi utiliza diferentes bandas de frecuencia, como 2.4 GHz y 5 GHz. La banda de 2.4 GHz ofrece una mayor penetración de señal, pero puede estar más congestionada debido a la presencia de otros dispositivos. La banda de 5 GHz generalmente proporciona velocidades más altas y menos interferencias.

2.3.4.2 *Bluetooth Low Energy (BLE)*

Bluetooth Low Energy (BLE), también conocido como Bluetooth Smart, es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para consumir muy poca energía, lo que la hace ideal para dispositivos con restricciones de energía, como dispositivos portátiles, sensores y dispositivos pequeños de comunicación, a continuación, se muestran algunas características (Pastorino, 2020 págs. 51-55):

- Una de las características más distintivas de BLE es su eficiencia energética. Está diseñado para funcionar con baterías pequeñas y puede ofrecer una vida útil de batería significativamente más larga en comparación con otras tecnologías de Bluetooth.
- BLE permite la comunicación inalámbrica entre dispositivos a corta distancia. Puede utilizarse para establecer conexiones punto a punto o en redes de área personal (PAN), lo que facilita la interconexión de dispositivos cercanos.
- Aunque BLE tiene un alcance más corto en comparación con otras versiones de Bluetooth, como Bluetooth Clásico, su limitado alcance es beneficioso para aplicaciones donde la proximidad es esencial.
- Opera en la Banda ISM 2.4 GHz

2.3.5 *Arquitectura de la Red LoRaWAN*

La intención es transmitir los datos capturados por los sensores a través del protocolo HTTP, donde el servidor desempeñará un papel crucial. LoRaWAN se basa en la tecnología LoRa (Long Range), que es una forma de modulación de radio diseñada para proporcionar comunicaciones de largo alcance y bajo consumo de energía en entornos de IoT (Internet de las cosas). La capa de red de LoRaWAN utiliza un protocolo propio, y las especificaciones definen cómo se gestionan las comunicaciones desde los nodos (dispositivos finales) hasta la red y viceversa (Baltuille, 2023 pág. 12).

LoRaWAN utiliza un esquema de comunicación bidireccional y asimétrico. Los nodos envían mensajes a través de canales de radio de baja potencia a una puerta de enlace (gateway), que luego transmite esos mensajes a la red central. La red central procesa y responde a los mensajes según sea necesario. LoRaWAN utiliza un esquema de red de estrella donde los nodos se comunican con una puerta de enlace, y la puerta de enlace actúa como intermediario entre los nodos y la red central (Hernández Caballero, 2020 págs. 27-30).

En la Ilustración 2-10, está constituido por diferentes componentes que desempeñan funciones específicas dentro de la red, y en esta sección los describimos brevemente (Ferro, y otros, 2021 págs. 28-30).

- **Nodos:** Son los dispositivos finales que envían y reciben información hacia el Gateway.
- **Gateways:** Conocidos también como puertas de enlace, concentradores o estaciones base - son dispositivos que capturan y reciben información relacionada con los dispositivos finales y la envían a través de una comunicación TCP/IP por WiFi, Ethernet o celular al servidor de red.
- **Servidor de Red:** El servidor de red o network server, se conecta a varios gateways por TCP/IP, y se encarga de eliminar mensajes duplicados y decidir qué gateway debe responder a un mensaje de nodo final. También controla en los nodos finales la tasa de transmisión de datos para maximizar la capacidad de la red y extender la vida útil de sus baterías.
- **Servidores de Aplicaciones:** Los servidores de aplicaciones establecen conexión con el servidor de red para intercambiar información asociada a las aplicaciones de los usuarios, como los datos necesarios para la visualización de un panel de control de monitoreo de dispositivos (dashboard). Existe la opción de desarrollar un software personalizado o emplear plataformas existentes que adquieren datos de los dispositivos.

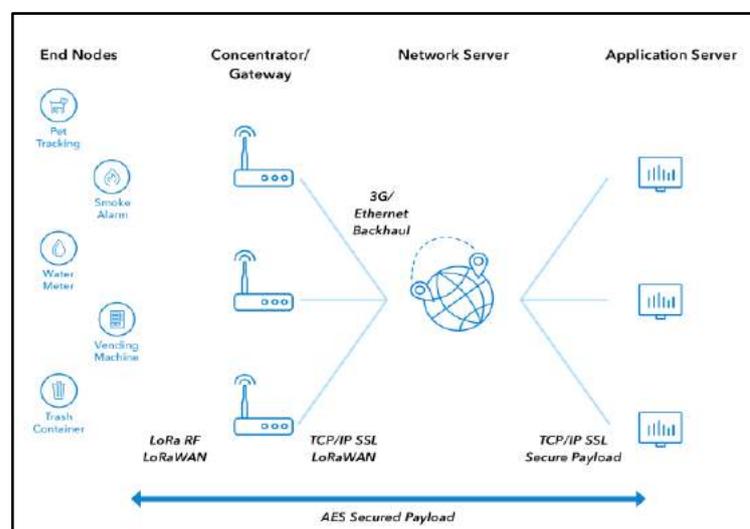


Ilustración 2-10: Arquitectura de Red LoraWan

Realizado por: (Lombrad, 2020)

2.3.5.1 Bandas LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es un protocolo de red de área amplia y baja potencia diseñada para la comunicación de larga distancia en el ámbito del Internet de las cosas (IoT). Las bandas de frecuencia en las que LoRaWAN opera pueden variar según la región del mundo debido a las regulaciones de espectro radioeléctrico locales como se visualiza en la Ilustración 2-11. Sin embargo, hay algunas bandas comunes utilizadas. Estas son (Taylor, 2020 págs. 5-6):

- 868 MHz: Esta banda es comúnmente utilizada en Europa para LoRaWAN. La frecuencia específica puede variar según el país, pero generalmente se encuentra alrededor de 868 MHz.
- 915 MHz: En América del Norte y Sur, así como en algunas otras regiones, la banda de 915 MHz se utiliza para implementaciones de LoRaWAN.
- 433 MHz: En algunas regiones, como Asia, la banda de 433 MHz también se asigna para LoRaWAN.



Ilustración 2-11: Bandas de Funcionamiento Regional LoRaWAN

Realizado por: (Venco, 2020 pág. 7)

LoRaWAN es una tecnología que funciona en la banda ISM. La asignación de frecuencias y los requisitos reglamentarios para ISM varían por región. Dos de las más populares son las frecuencias de 868 megahercios (MHz) utilizada en Europa y 915 MHz utilizada en América del Norte (López Caballero, y otros, 2020), en la siguiente Tabla 2-3 mostramos algunas de las características que usa LoRaWAN.

Tabla 2-3: Características Tecnología LoRaWAN

CARACTERÍSTICAS	LoRaWAN
Ancho de banda	250kHz y 125 kHz
Velocidad máxima de Datos	50 kbps

Frecuencia	US 902-928 MHz
Velocidad de Datos	980 bps – 21.9 kbps
Bidireccional	Half-Duplex
Máximo Mensajes / Día	Ilimitado
Distancias	5 km (urbano), 20 km (rural)
Inmunidad a interferencias	Muy alto
Autenticación y Encriptación	Si (AES-128)
localización	Si (TDOA)

Realizado por: Jeison O, 2024

- **Transmisión de Datos:** La velocidad de transmisión de datos es baja, pero no es importante para la mayoría de los procesos. La información se envía desde varios dispositivos de forma continuada. Pese a que la velocidad es de entre 0,3 y 50 Kbps, es suficiente para enfrentarse al volumen generado por la red, a la transmisión y recepción de datos (Marrique, y otros, 2022 pág. 26).

2.3.5.2 Seguridad LoRaWAN

Una seguridad sólida es un elemento clave de cualquier diseño, LoRaWAN utiliza cifrado AES de 128 bits y tiene dos capas independientes de seguridad, una clave de sesión de red (NwkSKey) y una clave de sesión de aplicación (AppSKey) como se muestra en la Ilustración 2-12 (Pickering, 2017 págs. 16-18).

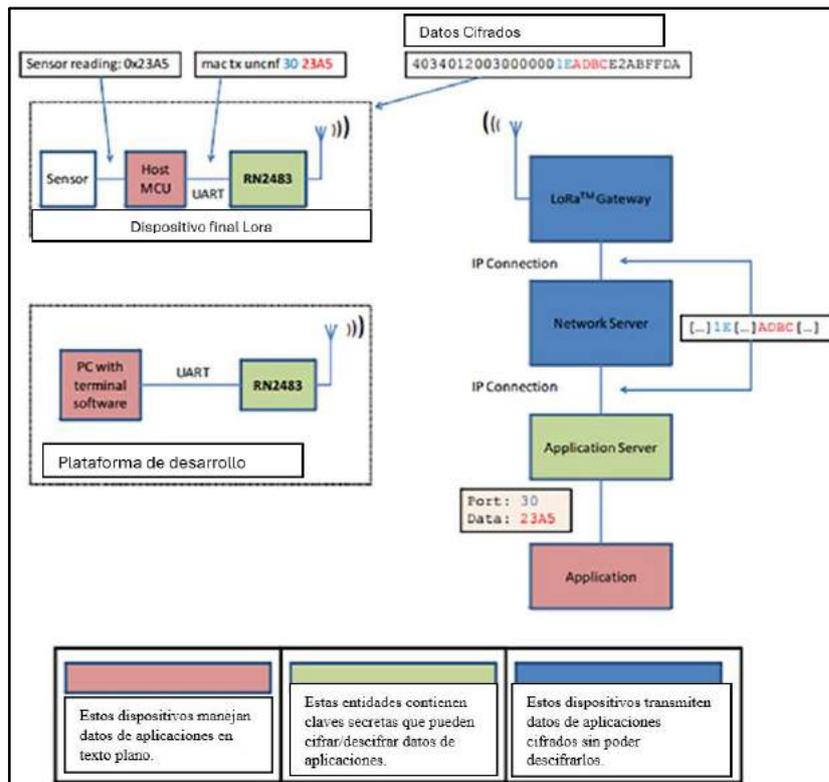


Ilustración 2-12: Seguridad AES para LoRaWAN

Realizado por: (Pickering, 2017 pág. 17)

En la Ilustración 2-12, mediante un ejemplo el funcionamiento de la seguridad en una red LoRaWAN. Un dispositivo adquiere datos de un sensor, los transmite a través de LoRa, donde son recibidos por el servidor de red mediante el gateway. Finalmente, estos datos llegan al servidor de la aplicación. Se destaca que únicamente el servidor de la aplicación tiene acceso a los datos del sensor en formato de texto plano. El flujo de datos desde un dispositivo final LoRa a la aplicación incluye cifrado y descifrado al principio y al final de la cadena, de modo que sólo el nodo final del sensor y la aplicación tengan acceso a los datos de texto sin formato. Hay dos métodos para implementar las claves (Pickering, 2017 págs. 19-22):

- **Activación mediante personalización (ABP):** Aquí, los dispositivos finales LoRaWAN pueden ser programados en fábrica con la información de autenticación para una determinada red LoRaWAN.
- **Activación inalámbrica (OTAA):** Este utiliza un ID de aplicación, un único ID de dispositivo, y una red de dispositivo asignado para obtener la dirección y NwksKey AppSKey. Este es el método preferido porque las claves no están predeterminadas y pueden ser regeneradas.

2.4 Tecnologías de detección y Localización de Descargas Atmosféricas

Comúnmente conocidas como tecnologías de detección de rayos, desempeñan un papel crucial en la monitorización y estudio de los fenómenos meteorológicos relacionados con tormentas eléctricas. Estas tecnologías están diseñadas para identificar, rastrear y localizar descargas atmosféricas, proporcionando información valiosa para la predicción de tormentas, la gestión de riesgos y la seguridad pública, las cuales se detallan algunas tecnologías.

2.4.1 Dirección de Llegada Basada en Interferometría (DOA)

Es una tecnología utilizada en el procesamiento de señales para determinar la dirección desde la cual una onda electromagnética, como una señal de radio o una onda acústica, llega a un sistema de antenas o sensores. Esta tecnología se basa en la interferometría, que es el estudio de patrones de interferencia resultantes de la superposición de ondas. En la banda VHF es una tecnología de detección basada en la medida de las diferencias de tiempo entre pares de antenas, pero con una distancia entre las antenas del orden de magnitud de una longitud de onda. En ese caso, la desigualdad de tiempo puede determinarse como una diferencia de fase y así, el sistema aprovecha la repetitividad temporal de la señal con el fin de integrar un gran número de pulsos, logrando una mayor precisión en la medición. De este modo, la única suposición es que la fuente no cambia de dirección aparente a lo largo del tiempo de integración (Pratt, 2023 pág. 12).

2.4.2 Red ATDnet

El sistema ATDnet es una red automática de localización de rayos capaz de detectar relámpagos sobre una zona geográfica amplia y variable. El sistema localiza los rayos al sincronizar la llegada de ondas de radio de muy baja frecuencia (conocidas como atmosféricas, o simplemente «féricas») generadas por golpes de rayos individuales en las estaciones ATDnet. Las diferencias en los tiempos de llegada de estos golpes a las estaciones de salida se utilizan para calcular la ubicación del rayo. Los datos se recogen cada minuto y BUFR se codifica utilizando la Plantilla BUFR universal para datos de rayos con 15 minutos de datos combinados en un archivo que luego se envía a EUMETSAT (estación en Reino Unido) (Vladislav, 2015 pág. 21).

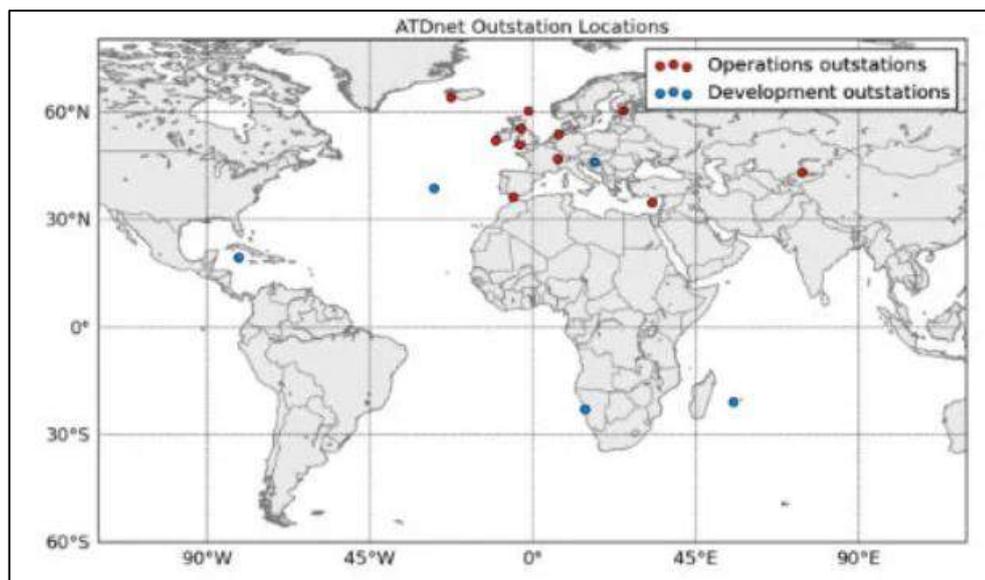


Ilustración 2-13: Localización de ATDnet en mayo 2013

Fuente: (Graeme, 2013 pág. 13)

La Met Office ha operado una red de localización relámpago VLF desde 1987. Las capacidades de largo alcance de esta red, que se refiere en su forma actual como ATDnet, permiten una eficiencia de detección relativamente continua en toda Europa con sólo un número limitado de sensores (Klugmann, y otros, 2014 págs. 12-15).

2.4.3 *Euclid (Red Europea)*

Este organismo europeo integra los sistemas de detección de rayos de casi toda Europa, la red contiene sensores capaces de informar en tiempo real de toda la actividad eléctrica asociada a las tormentas que se producen en el viejo continente. Que inició su trayectoria en 2001 con la misión de cubrir las necesidades de información sobre rayos que no se puedan satisfacer a través de las redes individuales y mantener un foro común para la identificación de mejoras en relación con el mantenimiento y explotación óptima de las redes, lo que redundará en una mayor calidad de los datos (Fernandez, 2014 pág. 3).

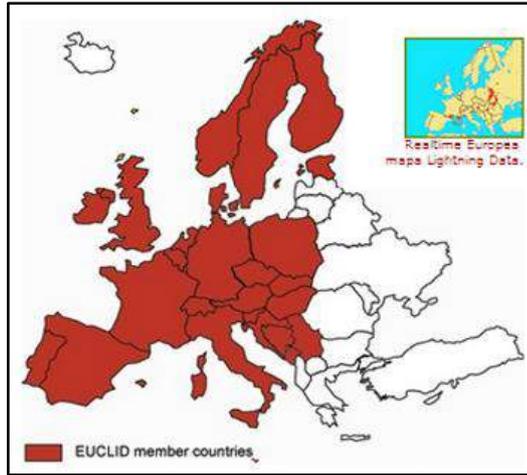


Ilustración 2-14: Detección de Rayos Euclod Europa

Fuente: (Aemet, 2014 pág. 8)

2.4.4 *Red Linet system*

Es un sistema de localización de rayos propio, independiente, de gran exactitud y fiable. Con LINET, nowcast ha desarrollado un sistema de localización de rayos excepcionalmente eficiente. Cumple con las más altas demanda, opera grandes redes de manera independiente siendo una tecnología alemana, su funcionamiento de estos sensores como se muestran en la Ilustración 2-15, miden las ondas electromagnéticas emitidas por los rayos de alrededor 250 km y envían los datos a la central procesadora, que obtiene los parámetros de cada rayo, principalmente: localización, tiempo, amplitud y altura (Smith, 2020 pág. 12)



Ilustración 2-15: Sensor de Detección de rayos Linet

Fuente: (Proter, 2022 pág. 17)

2.4.5 GLD360 (Red Global de Detección)

Detecta instantáneamente los rayos y la actividad conectiva en cualquier lugar en tierra y mar. se entrega como un flujo de datos; sin necesidad de invertir en hardware. El servicio de datos globales de rayos dataset GLD360 de Vaisala entrega información sobre rayos en tiempo real para detectar y rastrear condiciones meteorológicas extremas de manera precisa y temprana, a continuación, algunas de sus características (Vaisala, 2015 págs. 12-17):

- Con sensores de muy baja frecuencia (VLF)
- Eficiencia de detección de tormenta eléctrica mejor
- Detecta con precisión las descargas eléctricas en todo el mundo
- Puede localizarlas con una precisión de hasta 5 km
- Precisión de sincronización de eventos de 1 microsegundo en RMS.

2.5 Arquitectura LoraWan

LoRaWAN es una especificación que define tanto el protocolo de comunicaciones como la arquitectura de red. El protocolo LoRaWAN describe las siguientes capas (Navarro Ortiz, 2021):

- **Capa Física:** Establece la comunicación y opera en la banda ISM (915 MHz en todo América). Además, utiliza la modulación LoRa para establecer enlaces de comunicación a largo alcance con poca potencia. Esto es posible al emplear el parámetro spreading factor (SF) que permite buscar un compromiso entre robustez y velocidad, modificando además el número de canales ortogonales donde transmitir sin colisiones.
- **Capa MAC:** Gestiona el acceso al medio, es decir, los canales y parámetros de conexión.

Por otra parte, LoRaWAN establece una estructura de red mostrada en la Ilustración 2-16 y las características de seguridad que implementa. La red se compone de cuatro categorías de dispositivos como se muestra en la Ilustración (Navarro Ortiz, 2021):

- **Servidores de Red:** Autentica los nodos, comprueba la integridad de los mensajes y los enruta a los servidores de aplicación.
- **Servidor de Aplicación:** Incorpora mecanismos de confidencialidad de mensajes y gestiona las solicitudes.

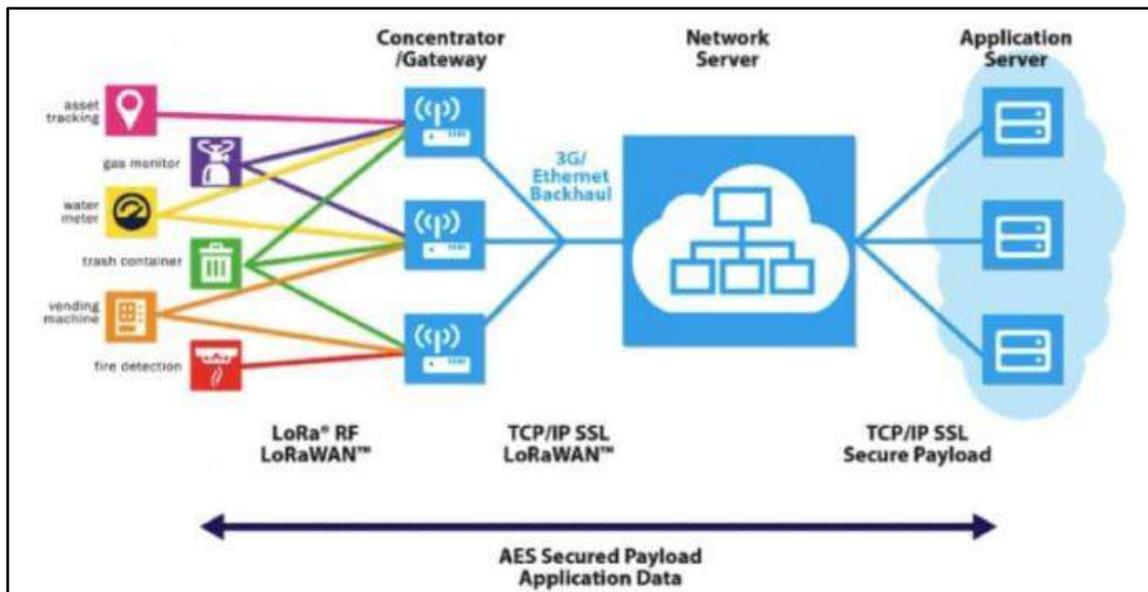


Ilustración 2-16: Arquitectura LoraWan

Fuente: (Johnson, 2022 pág. 5)

La idea fundamental de la red es que permita transmitir información (mensajes y localización) desde cualquier dispositivo LoRa hasta el nodo central, incluso si estos se encuentran en zonas sin cobertura. Respecto a la conectividad entre los dispositivos como se visualiza en la Ilustración 2-17 conforman la red y las funcionalidades que cada uno atribuye se especifican a continuación (Romero, 2021 pág. 28):

- i. **Mota:** Permite el envío/recepción de mensajes hacia el dispositivo Lora usando comunicación LoRaWAN para la retransmisión hasta el gateway.
- ii. **Gateway:** Se encarga de la recepción de los mensajes LoRa y lo retransmite al servidor a través de Wi-Fi.
- iii. **Noto Central:** Permite trabajar en modo estático o dinámico, siempre que ofrezca cobertura al equipo y entre nodos exista línea de vista. Se encarga de actualizar el servidor. Este servidor se emplea para el almacenamiento de los mensajes que se enviaron desde los demás dispositivos Lora.

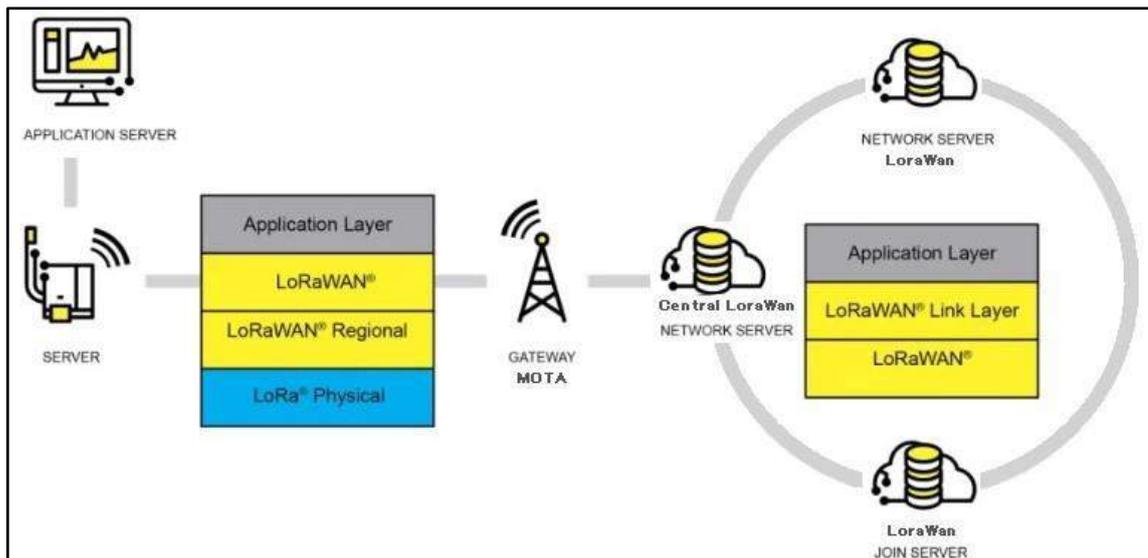


Ilustración 2-17: Arquitectura de Red LoRaWan

Fuente: (Brown, 2022 pág. 29)

2.6 Plataformas LoRaWan

Las plataformas o dashboard que opera el protocolo de comunicación LoRaWan representan entornos que posibilitan el almacenamiento, gestión, procesamiento y compartición de vasta información. A continuación, se presentan las plataformas más habituales y ampliamente empleadas en el mercado actual.

2.6.1 Ubidots

Ubidots es una plataforma de procesamiento en la nube que proporciona servicios para la creación y gestión de aplicaciones que permite a los usuarios recopilar, visualizar y analizar datos de dispositivos (sensores) conectados a través de la web (Jones, 2022 págs. 2-5).

- Permite almacenar datos generados por dispositivos que dispongan de Wifi, como sensores y actuadores, en la nube.
- Ofrece herramientas para crear paneles y gráficos interactivos que muestran los datos recopilados, facilitando la comprensión y el análisis.
- Permite configurar alertas y notificaciones basadas en condiciones específicas, lo que ayuda a los usuarios a responder rápidamente a cambios o eventos importantes.
- Puede integrarse con otras plataformas y servicios, facilitando la conexión con sistemas existentes y la expansión de las capacidades de la aplicación Lora.

- Proporciona APIs que permiten a los desarrolladores personalizar y ampliar las funcionalidades de la plataforma según las necesidades específicas.

2.6.2 ThingSpeak

ThingSpeak es una plataforma de Internet de las cosas que permite recopilar, visualizar y analizar datos generados por dispositivos conectados a Internet. Fue desarrollada por MathWorks, la empresa detrás de MATLAB. ThingSpeak se destaca por ser una plataforma abierta que proporciona servicios en la nube y herramientas para el desarrollo de proyectos (García, 2018 págs. 9-13).

- Los usuarios pueden crear canales para organizar y almacenar datos. Cada canal representa una secuencia de datos de un conjunto específico de sensores o dispositivos.
- Dentro de cada canal, hay campos que almacenan datos específicos. Por ejemplo, un campo podría representar la temperatura, otro la humedad, etc.
- ThingSpeak proporciona herramientas para crear gráficos y visualizaciones personalizadas en tiempo real, lo que facilita la comprensión de los datos recopilados.
- Permite configurar acciones automáticas basadas en condiciones predefinidas. Por ejemplo, enviar una notificación por correo electrónico si un valor supera un umbral específico.
- Dado que MathWorks desarrolla ThingSpeak, hay una integración estrecha con MATLAB, permitiendo a los usuarios analizar datos utilizando herramientas avanzadas de análisis y visualización.

2.6.3 Node-Red

Es un entorno de desarrollo de código abierto para conectar dispositivos, APIs y servicios en el ámbito del Internet de las cosas. Fue creado por IBM Emerging Technology y está diseñado para facilitar la creación de flujos de trabajo visuales para la integración y automatización de sistemas, algunas características clave de Node-RED incluyen (Sant, 2022 págs. 15-21).

- Node-RED proporciona una interfaz gráfica basada en navegador que permite a los usuarios construir flujos de trabajo mediante la conexión de nodos predefinidos.
- Los nodos son bloques de construcción fundamentales en Node-RED. Representan funciones o servicios específicos y pueden ser arrastrados y soltados en la interfaz para construir flujos de trabajo.

- Los flujos son conjuntos de nodos conectados que realizan una tarea específica. Los flujos se crean visualmente mediante la conexión de nodos en la interfaz de usuario.
- Node-RED es extensible y se puede ampliar con la incorporación de nuevos nodos y paquetes que agregan funcionalidades adicionales.
- Node-RED está diseñado para trabajar especialmente bien con dispositivos y servicios en el ámbito del IoT. Puede conectarse a una variedad de dispositivos, servicios en la nube, bases de datos y APIs para facilitar la integración y automatización.
- Node-RED se basa en Node.js, lo que permite la ejecución en diferentes plataformas y sistemas operativos.

2.6.4 *The Things Network (TTN)*

Es una comunidad global que proporciona una infraestructura abierta y gratuita para redes LoRaWAN (Long Range Wide Area Network). Su objetivo principal es construir y gestionar una red de Internet de las cosas (IoT) de baja potencia y largo alcance mediante el uso de la tecnología LoRaWAN. Esta red es diseñada para conectar dispositivos IoT de bajo consumo de energía, como sensores y actuadores, que necesitan transmitir datos a largas distancias. Algunos puntos sobre The Things Network incluyen (Brown, 2022 págs. 31-37).

- TTN opera como una comunidad colaborativa en la que los usuarios pueden contribuir proporcionando gateways (puertas de enlace) para ampliar la cobertura de la red. Estos gateways son esenciales para recibir y transmitir datos entre los dispositivos LoRaWAN y la nube.
- TTN es gratuito para los usuarios y utiliza un modelo de código abierto. Esto significa que la infraestructura de red y las herramientas asociadas están disponibles para que la comunidad las utilice y contribuya.
- Además de la infraestructura de red, TTN ofrece herramientas y servicios para facilitar el desarrollo y la gestión de aplicaciones IoT. Esto incluye la posibilidad de registrar y gestionar dispositivos, así como herramientas de visualización de datos.
- La comunidad TTN opera a nivel mundial, lo que significa que los dispositivos registrados en la red pueden comunicarse a través de gateways en diferentes ubicaciones geográficas. Esto hace que TTN sea una opción interesante para proyectos que requieren cobertura global o que se extienden a través de áreas geográficas extensas.

2.7 Características de los Dispositivos Electrónicos

Los siguientes Dispositivos Eléctricos que se describen a continuación, forman parte del presente trabajo de titulación.

2.7.1 Características del módulo LoRaWAN

El módulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32 como se muestra en la Ilustración 2-18 es un dispositivo electrónico que fusiona con la tecnología LoRaWAN para comunicaciones de largas distancias, dispone de un microcontrolador de bajo consumo y alto rendimiento, ya que es capaz de enviar y recibir información a largo alcance de forma eficiente (Miller, 2023 págs. 4-9).

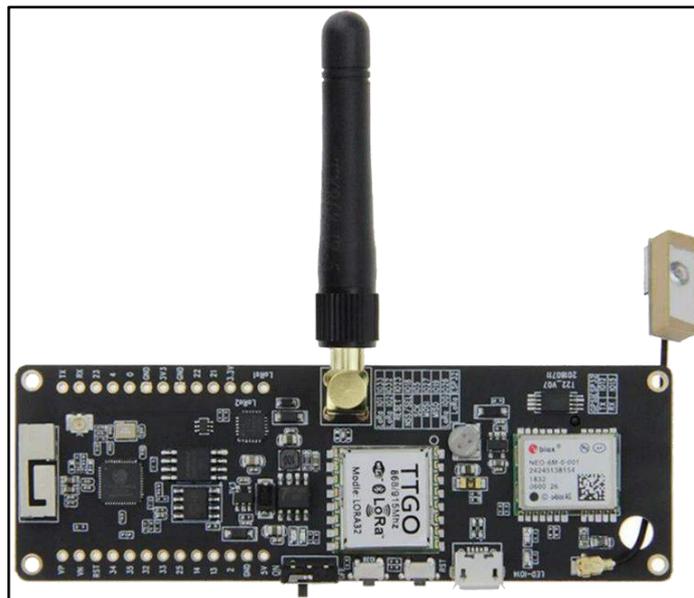


Ilustración 2-18: Dispositivo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32

Realizado por: (Miller, 2023 pág. 2)

- **ESP32:** Para habilitar LoRaWAN viene incorporado el módulo ESP32 ya que éste se encarga de la parte lógica de aplicación, mientras que el módulo LoRa se encarga de la capa física y de enlace de datos de la comunicación LoRaWAN. El módulo utiliza el microcontrolador ESP32 como su unidad central proporcionando capacidad de procesamiento de doble núcleo.
- **Wifi:** Opera mediante el protocolo 802.11 b/g/n y con 802.11 n (2.4 GHz) tiene velocidad de hasta 150 Mbps.

- **Bluetooth:** Cumple con las especificaciones de Bluetooth v4.2 BR/EDR y LE (Low Energy), tiene una velocidad de hasta 4 Mbps, +9dBm de potencia de transmisión, redes piconet y scatternet;
- **4 MB PSRAM:** Significa (RAM Pseudoestática) Tiene 4 megabytes de RAM estático.
- **4 MB Flash:** Capacidad de 4 megabytes de almacenamiento en la memoria flash.

- **LoRa:** Significa Long Range, es una tecnología de modulación de radio utilizada para la comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo de energía, algunas de sus características a continuación:

- **Voltaje de funcionamiento:** 1,8 ~ 3,7 v
- **Corriente de transmisión:** 120mA @ + 20dBm - 90mA @ + 17dBm - 29mA @ + 13dBm
- **Frecuencia de funcionamiento:** 868 MHz (EU), 915 MHz (US), 433MHz (AS)
- **Potencia de transmisión:** + 20dBm
- **Velocidad de datos:** 1.2K ~ 300Kbps @ FSK; 0.018K ~ 37.5Kbps @ LoRa
- **Sensibilidad de recepción:** -139dBm @ LoRa & 62,5 Khz & SF = 12 y 146bps; -136dBm @ LoRa y 125 Khz y SF = 12 y 293bps; -118dBm @ LoRa y 125 Khz y SF = 6 y 9380bps
- **Error de frecuencia:** +/-15 KHz
- **Interfaz forma:** SPI

- **GPS:** Incluye un módulo GPS lo que hace adecuado para aplicaciones que requieren la ubicación geográfica, permitiendo datos de la posición en donde se encuentre instalado el prototipo de descargas atmosféricas. A continuación, algunas de sus características:

- Módulos GPS NEO-6M, fuente de alimentación de 3 V-5 V
- Módulo con antena de cerámica
- Guarda los datos de los parámetros de configuración

2.7.2 Características del Sensor AS3935

El sensor AS3935, representado en la Ilustración 2-19, es un dispositivo completamente integrado y programable diseñado para identificar la presencia y aproximación de actividades de rayos en las cercanías. Además, ofrece una estimación de la distancia hasta la cabeza de la tormenta. Este sensor incluye un algoritmo especializado para la detección de rayos que analiza el patrón de la señal de entrada, descartando posibles interferencias al clasificarlas como ruido y distorsión (Lightning, 2020 pág. 2).

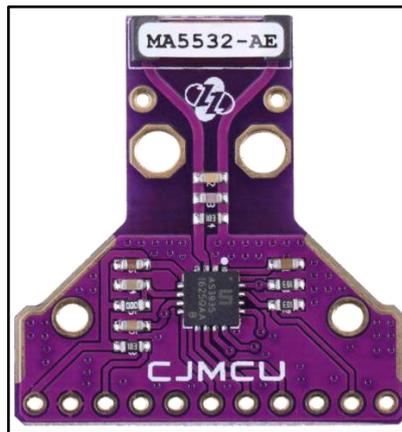


Ilustración 2-19: Sensor CJMCU AS3935

Realizado por: (ELECBEE, 2023)

El sensor de rayos proporciona alertas sobre la actividad de tormentas eléctricas en un radio de 40 km. La estimación de la distancia hasta 1 km desde la cabeza de la tormenta se lleva a cabo en 14 pasos, como se muestra en la Ilustración 2-20. Este sensor puede detectar destellos tanto de nube a tierra como de nube a nube. Para el control y lectura de registros, se utiliza la interfaz SPI. El rango de alimentación del sensor AS3935 es de 2.4 V a 5.5 V. Además, incorpora una antena tipo inductor MA-5532 fabricada por Coilcraft, que es capaz de detectar la luz del rayo en un rango de frecuencias de 500 kHz a 2 MHz (ams, 2016 pág. 12).

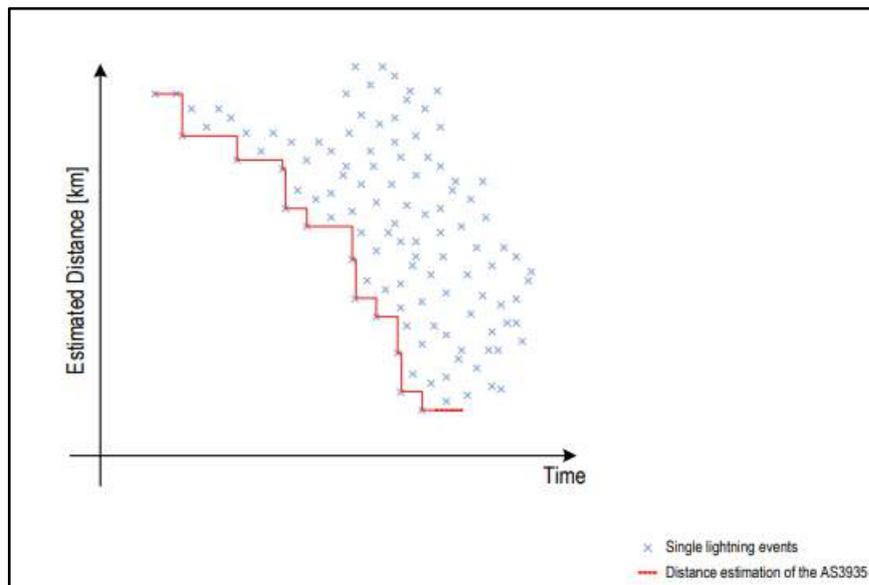


Ilustración 2-20: Apreciación de distancia a detectar

Realizado por: (Lightning, 2020)

Según Henry (Heilmann, y otros, 2019 págs. 3-4), el sensor AS3935 exhibe una Eficiencia de Detección Absoluta (ADE) del 75.37% para distancias inferiores a 20 km. Sin embargo, presenta una ADE del 14.06% para distancias entre 20 y 40 km, como se ilustra en la Ilustración 2-21. Esto demuestra que al detectar ondas en el espectro de LF (Frecuencia Baja) en el campo cercano, logra una eficiencia de detección superior en comparación con la detección en el campo lejano.

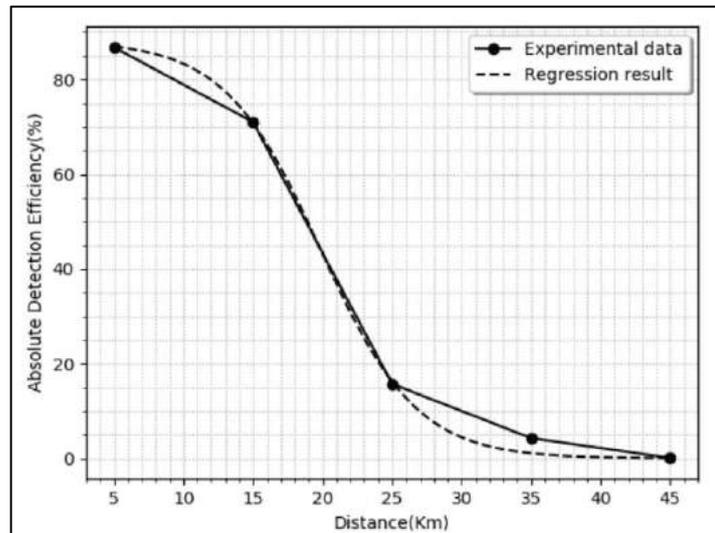


Ilustración 2-21: Eficacia de detección por distancia

Realizado por: (Heilmann, y otros, 2019 pág. 4)

Se describen algunas de las características importantes que tiene el sensor AS3935, ya que en la utilización dependerá mucho de su comportamiento:

- **El sensor AS3935:** Ideal para estaciones meteorológicas, portátiles y relojes.
- **Rango de detección:** Es de 1 a 40 km y se obtiene por la salida digital IRQ.
- **Combinado:** Por una antena MA-5532 que detecta las ondas electromagnéticas de la luz del rayo, y trabaja en un rango de 500 kHz a 2 MHz.
- **Alimentación:** Por un voltaje de 2.4 V a 5.5 V

El algoritmo de detección de rayos valida la señal basándose en el umbral de vigilancia establecido en **REG0x01[3:0]=0100**. Si la señal se clasifica como perturbadora, el evento se rechaza y el sensor se desactiva durante 1,5 segundos antes de volver automáticamente al "modo escucha". En el caso de que la señal sea validada y se clasifique como detección de rayos con **REG0x01[3:0]=1000**, se realiza el cálculo de energía y se proporciona una estimación de la distancia. Alternativamente, la señal puede ser clasificada como ruido, en cuyo caso **REG0x01[3:0]=0001** (Heilmann, y otros, 2019 págs. 7-9).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

El presente capítulo presenta los métodos utilizados para la implementación del sistema de localización de descargas atmosféricas de manera ordenada y secuencial. En la Sección 3.1 se presenta el Gestor de Tareas, en el cual se especifica las cinco etapas de actividades para el desarrollo del Trabajo de Titulación. En la Sección 3.2 se estudia los métodos de localización de descargas atmosféricas. En la Sección 3.3 se estudia el protocolo de comunicación LoraWan para el trabajo de titulación. En la Sección 3.4 se diseñará un prototipo de descargas atmosféricas. En la Sección 3.5 se implementará el prototipo de descargas atmosféricas utilizando el método de multiestación. Finalmente, en la Sección 3.6 se realizará pruebas del funcionamiento del prototipo para la localización del rayo.

3.1 Gestor de Tareas

Con la finalidad de estructurar de manera ordenada las tareas a desarrollar para la consecución de este proyecto, se propone a continuación cinco etapas, a cada una le corresponderá un grupo de actividades.

- **Etapa 1. Estudiar el método de localización de descargas atmosféricas para la implementación del prototipo:** Se selecciona el método de multiestación como ideal para la obtención de la localización del rayo.
- **Etapa 2. Analizar el protocolo de comunicación LoraWan para la implementación del prototipo de localización de descargas atmosféricas:** El protocolo de comunicación LoraWan es apta para este proyecto de titulación.
- **Etapa 3. Diseñar el prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan:** Esta etapa tiene como objetivo diseñar el funcionamiento de los tres prototipos que conforman el sistema de localización de descargas atmosféricas (rayos), Esta etapa se subdivide en tres subetapas.
- **Sub-Etapa 1. Descripción de la región de Estudio:** La región de investigación abarca el cantón Riobamba y sus alrededores, empleando el método de multiestación. Se cuentan con datos meteorológicos que serán utilizados como punto de referencia fundamental para el desarrollo de este Trabajo de Titulación.

- **Sub-Etapa 2. Establecer Conexiones del Prototipo:** Se analizan los elementos a emplear, como los sensores AS3935, el módulo LoRa, y la interconexión mediante enlace entre estos dispositivos. Además, se investiga el protocolo de comunicación LoRaWAN utilizado para el correcto funcionamiento del prototipo.
- **Etapa 4. Implementar el prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan:** Con el análisis previo de la ubicación estratégica, se procede a colocar los tres prototipos de localización de descargas atmosféricas en el cerro Cacha, cerro San Francisco, ciudad Riobamba; y, se monitorea los datos obtenidos por cada uno de estos nodos en la plataforma Node-Red.
- **Etapa 5. Realizar pruebas del funcionamiento del prototipo de descargas atmosféricas para la localización del rayo:** En esta fase final, se llevará a cabo la simulación de la distancia de detección utilizando datos aleatorios generados por tres sensores. Esto permitirá realizar el cálculo y la representación gráfica del método de multiestación.

Las cuatro fases esenciales se ilustran en el diagrama de bloques de la Ilustración 3-1. Este gráfico proporciona una representación visual del proceso de desarrollo del prototipo con la tecnología LoraWan, diseñado para detectar la ubicación de descargas atmosféricas, como se detalla en el presente Trabajo de Titulación.

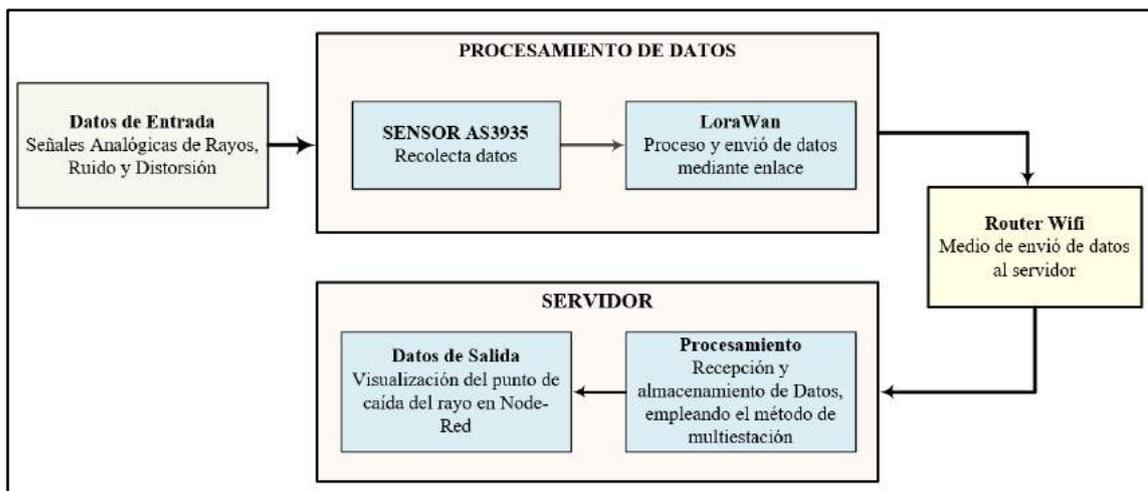


Ilustración 3-1: Diagrama de bloques del proceso del prototipo de localización de rayos

Realizado por: Jeison O, 2024

3.2 Método de localización de descargas atmosféricas para la implementación del prototipo.

En este segmento, se expone el método de multiestación como la opción ideal, destacando su conveniencia en términos de cálculo gracias a su enfoque gráfico.

3.2.1 Multiestación (método de localización de descargas atmosféricas)

Basándonos en los principios abordados en la Sección 2.2.4, se ha establecido teóricamente el funcionamiento de este método gráfico. Con el objetivo de calcular el punto de intersección de tres circunferencias, se presenta un ejemplo implementado en Node-Red. Los datos correspondientes se detallan en la Tabla 3-1 y se describen a continuación:

Tabla 3-1: Ejemplo para el cálculo del método de multiestación.

Sensores	Detalles			Ecuación General de la circunferencia
	Radio de círculos (km)	Posición en el Plano k(m)		
		h_x (eje x)	k_y (eje y)	
Sensor Cacha	$r_C = 3.1623$	$h_C = -2$	$k_C = 2$	$(x - h_C)^2 + (y - k_C)^2 = r_C^2$
Sensor S.Francisco	$r_{SF} = 3.056$	$h_{SF} = 4$	$k_{SF} = 3$	$(x - h_{SF})^2 + (y - k_{SF})^2 = r_{SF}^2$
Sensor Riobamba	$r_R = 6$	$h_R = 1$	$k_R = -5$	$(x - h_R)^2 + (y - k_R)^2 = r_R^2$

Realizado por: Jeison O, 2024

Donde,

- r_C es el radio circular dado por el sensor Cacha
- $r_{S,F}$ es el radio circular dado por el sensor San Francisco
- r_R es el radio circular dado por el sensor Riobamba
- h_C es la coordenada en el eje x del sensor Cacha en el plano cartesiano
- $h_{S,F}$ es la coordenada en el eje x del sensor San Francisco en el plano cartesiano
- h_R es la coordenada en el eje x del sensor Riobamba en el plano cartesiano
- k_C es la coordenada en el eje y del sensor Cacha en el plano cartesiano
- $k_{S,F}$ es la coordenada en el eje y del sensor San Francisco en el plano cartesiano
- k_R es la coordenada en el eje y del sensor Riobamba en el plano cartesiano
- x, y son variables utilizadas para representar las coordenadas de un punto en el plano cartesiano 2D, y surgen como resultado de la intersección.

A continuación, se lleva a cabo la sustitución de los valores de radios circulares, así como de las coordenadas de posición h_x, k_y ; y en la ecuación general de la circunferencia asociada a cada sensor detallado en la Tabla 3-1.

Sensor Cacha:

$$(x - h_C)^2 + (y - k_C)^2 = r_C^2 \quad \rightarrow \quad x^2 + y^2 + 4x - 4y = 2 \quad (1)$$

Sensor San Francisco:

$$(x - h_{SF})^2 + (y - k_{SF})^2 = r_{SF}^2 \quad \rightarrow \quad x^2 + y^2 - 8x - 6y = -15.66 \quad (2)$$

Sensor Riobamba:

$$(x - h_R)^2 + (y - k_R)^2 = r_R^2 \quad \rightarrow \quad x^2 + y^2 - 2x + 10y = 10 \quad (3)$$

De esta manera, las tres ecuaciones dependen de x, y . Por lo tanto, se procede a realizar los cálculos de la triangulación de los tres sensores. Inicialmente, se lleva a cabo la intersección entre el sensor Cacha y Riobamba, seguido por la intersección entre el sensor Cacha y San Francisco, y finalmente, entre el sensor San Francisco y Riobamba. Comenzando con el cálculo de la intersección entre el sensor Cacha y Riobamba, se utiliza el método de sustracción. Se parte de la ecuación (1) y (3). Para la ecuación (3), se multiplica por -1 y se realiza la suma algebraica, como se muestra a continuación:

$$\begin{array}{r} x^2 + y^2 + 4x - 4y = 2 \quad (1) \\ -x^2 - y^2 + 2x - 10y = -10 \quad (3) \\ \hline 6x - 14y = -8 \quad (4) \end{array}$$

La ecuación (4) se deriva de la suma algebraica, y al despejar la variable y , se obtiene la ecuación (5).

$$y = \frac{8+6x}{14} \quad (5)$$

Al incorporar la ecuación (5) en la ecuación (1), obtenemos:

$$x^2 + \left(\frac{8+6x}{14}\right)^2 + 4x - 4\left(\frac{8+6x}{14}\right) = 2 \quad (6)$$

Posteriormente, al simplificar la ecuación (6), se adquiere en la ecuación (7):

$$1.18x^2 + 2.77x - 3.95 = 0 \quad (7)$$

Al resolver la ecuación (7), se procede a despejar la variable x , como se muestra en la ecuación (8):

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (8)$$

Donde,

$$a = 1.18$$

$$b = 2.77$$

$$c = -3.95$$

En la etapa final, al sustituir las constantes a , b y c en la ecuación (8), se obtienen los dos valores de x , denotados como, (x_1, x_2) .

$$x_1 = -3.3474$$

$$x_2 = 1$$

Utilizando los valores de (x_1, x_2) y sustituyéndolos en la ecuación (5), se calculan los correspondientes valores de y , expresados como (y_1, y_2) .

$$y_1 = -0.8631$$

$$y_2 = 1$$

Finalmente, el resultado consiste en las dos coordenadas (x_1, y_1) y (x_2, y_2) . A continuación, al seguir el mismo procedimiento entre el sensor San Francisco y Riobamba, así como entre el sensor Cacha y San Francisco, se obtienen los puntos de intersección:

Ubicación San Francisco – Riobamba: $(x_1 = 4.94, y_1 = -0.48); (x_2 = 1, y_2 = 1)$

Ubicación Cacha – San Francisco: $(x_1 = 0.52, y_1 = 3.91); (x_2 = 1, y_2 = 1)$

Ubicación Cacha – Riobamba: $(x_1 = -3.3474, y_1 = -0.8631); (x_2 = 1, y_2 = 1)$

En consecuencia, el resultado de la triangulación entre los tres sensores (Cacha, San Francisco y Riobamba) se presenta en la Ilustración 3-2:

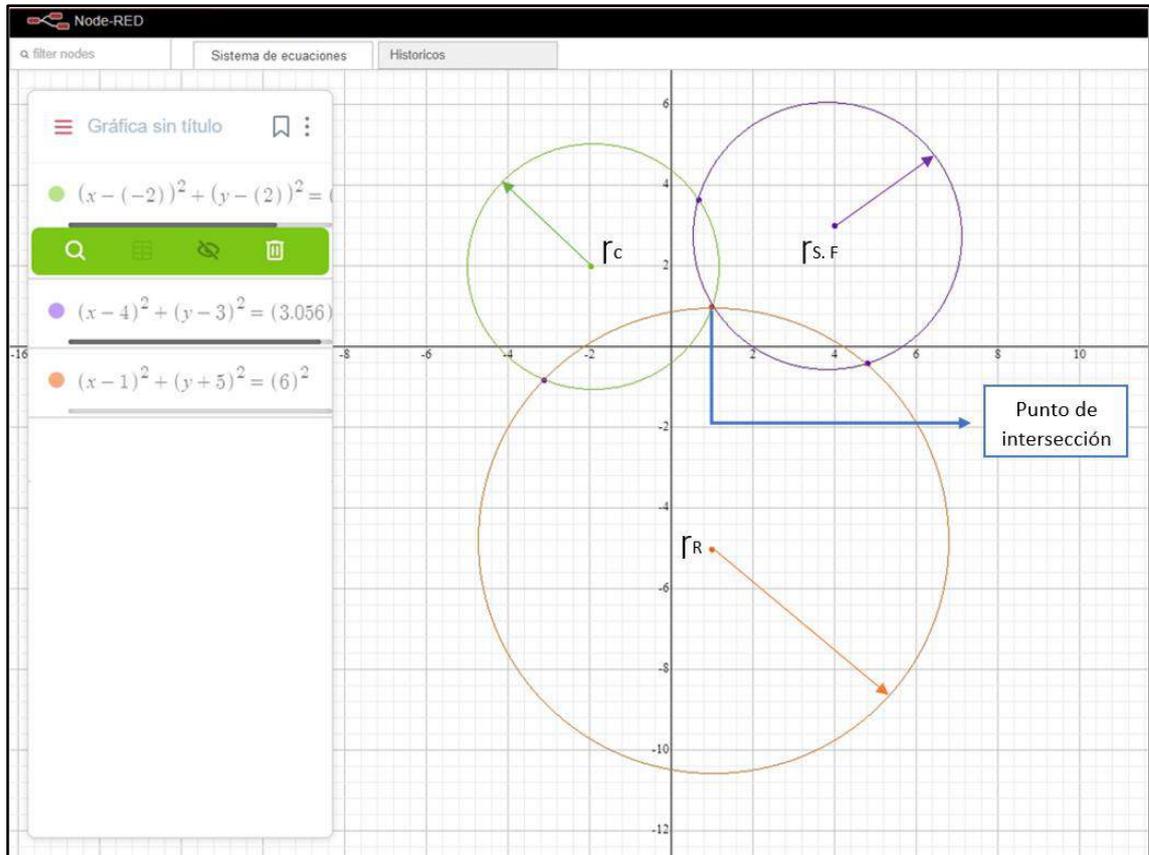


Ilustración 3-2: Método de Multiestación en Node-Red

Realizado por: Jeison O, 2024

La triangulación es un método comúnmente utilizado para la localización de descargas atmosféricas, este método se basa en estimar la ubicación de la caída del rayo, mediante una señal generada por un rayo en tres o más ubicaciones estratégicas conocidas, y luego utilizar esa información para determinar la ubicación precisa de la descarga.

En el método de triangulación, se utilizan estaciones receptoras distribuidas en una región geográfica. Cada estación mide el tiempo que tarda la onda electromagnética generada por la descarga atmosférica en llegar a la estación.

Con el estudio y análisis del método de multiestación o también conocido como triangulación, ha sido factible para la localización de descargas atmosféricas y finalmente tomado en cuenta para el desarrollo e implementación del trabajo de titulación.

3.3 Protocolo de comunicación LoraWan para el prototipo de localización de descargas atmosféricas

El protocolo utilizado para el prototipo de localización es el de LoraWan, para lo cual es importante analizar su comunicación por capas de esta tecnología, e integrándolos mediante conforma el sistema del prototipo.

3.3.1.1 Capa MAC

Esta fase se relaciona con la parte de Hardware, es decir, con los dispositivos físicos situados en el perímetro del sistema. Para la interacción entre el sensor AS3935 y el módulo LoraWan, se emplea la interfaz SPI con su modulación GMSK. En cuanto a la comunicación entre el módulo y el Punto de Acceso, se utiliza el protocolo IEEE 802.11 b/g/n graficada en la Ilustración 3-3; las características específicas de estos métodos se describen a continuación:

- **SPI (Serial Peripheral Interface):** Es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para transferencia de información entre módulos LoRa, éstos son entornos donde se requiere una comunicación rápida y eficiente entre un controlador máster, donde actúa como receptor y uno o varios dispositivos esclavos (nodos), donde actúa como receptor en una serie sincrónica de datos (Romano Téllez, 2018 págs. 4-7).
- **GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying):** Es una forma de modulación de señal manejada en comunicaciones digitales. Se utiliza comúnmente en sistemas de radio enlace y telecomunicaciones, donde se busca una transmisión eficiente y confiable de datos (Torres Nova, y otros, 2008 págs. 76-80).
- **IEEE 802.11 b/g/n:** Representa un protocolo Wi-Fi para comunicación inalámbrica con el módulo LoRa y, como se detalla en la Ilustración 3-3, operando en frecuencias de 2.4 GHz. La velocidad de transmisión y el alcance pueden variar según el canal y el número de antenas MIMO incorporados.

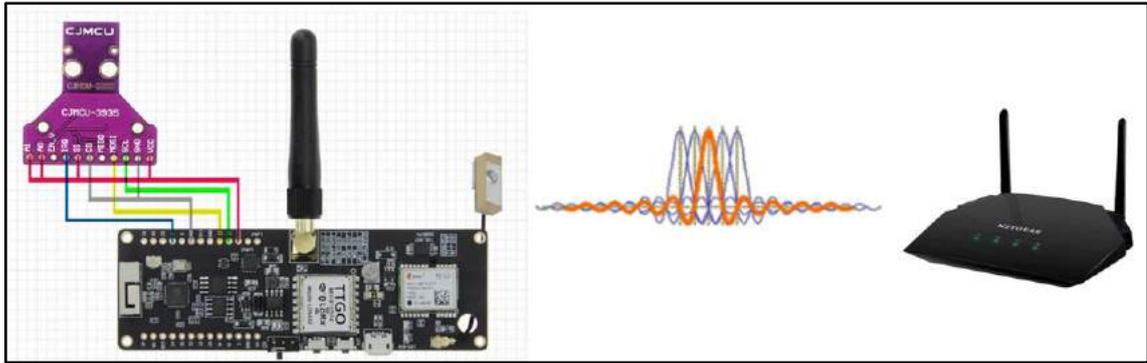


Ilustración 3-3: Comunicación WiFi con el módulo LoRa

Realizado por: Jeison O, 2024

3.3.1.2 Capa de Aplicación

En la capa de aplicación, la transmisión de datos al servidor Node-Red se realizará mediante el protocolo de transferencia de hipertexto HTTP. En consecuencia, se revelan las características fundamentales de dicho protocolo.

- **HTTP (Protocolo de Transferencia de Hipertexto):** Es un protocolo comúnmente empleado para la transferencia de información a través de la web. Fue creado con el propósito de simplificar la comunicación entre servidor y el navegador web, consiguiendo un enfoque cliente-servidor y la información se encapsula en TCP. Cada recurso en HTTP está identificado por medio de una URI (Identificado Uniforme de Recursos), que suministra los detalles necesarios para ubicar y acceder al recurso (Corrales Rubiano, y otros, 2013 págs. 4-6). En la Ilustración 3-4 proporciona las partes de la URI para acceder a la visualización de las descargas atmosféricas.



Ilustración 3-4: Partes de una (URI)

Realizado por: Jeison O, 2024

3.3.1.3 Capa de Red

En la siguiente capa se estableció la dirección IP a la cual se conectó el módulo LoRa con el con el punto de acceso (WiFi), para transmitir los datos recolectados por los tres prototipos hacia el servidor Node-Red. En este caso el prototipo (nodo) máster que se encuentra en un domicilio al norte de la ciudad Riobamba, se configuró mediante DHCP a una dirección IPv4 entre un rango de red 192.168.1.1 y 192.68.1.255 su máscara de 255.255.255.0. Facilitando una conexión estable para el dispositivo.

3.3.1.4 Distancia de Conexión de Dispositivos LoRaWAN.

La tecnología LoRaWAN está diseñada para interconectarse entre módulos LoRa y funcionar en ciudades atravesando todo tipo de obstáculos. En presencia de numerosos edificios y construcciones, en sector Urbano dispone de un alcance de cinco kilómetros. Sin embargo, la capacidad aumenta en el sector Rural a los 20 km en zonas abiertas con línea de vista para su conexión como se observa en la Ilustración 3-5 (Rodríguez Munca, 2016 págs. 55-58).

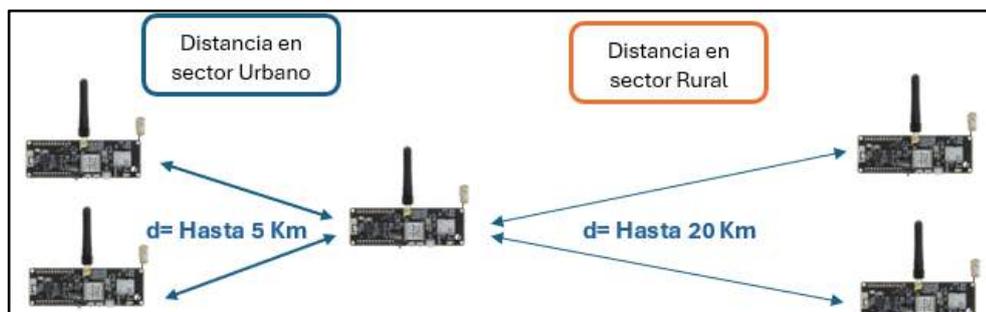


Ilustración 3-5: Distancias de Interconexión entre módulos LoraWan

Realizado por: Jeison O, 2024

3.4 Diseño del prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan.

El correcto funcionamiento del prototipo de descargas atmosféricas depende la interconexión entre modulos y la configuración de los mismo. Para ello, en este apartado se procede a caracterizar el área de estudio del diseño. Luego, difundir las características principales de cada componente del prototipo. Después, se realiza la conexión basada en los conceptos teóricos y finalmente la programación y procesamiento de los datos en el servidor.

3.4.1 Ubicaciones Estratégicas de Cobertura a monitorear

Basándonos en el análisis previo de datos climatológicos, se ha identificado como un área estratégica significativa la mayor parte de la ciudad de Riobamba y sus mediciones. De manera similar, se ha seleccionado una ubicación específica para los prototipos, considerando aspectos como la disponibilidad de energía eléctrica y la línea de vista necesaria para la interconexión entre los nodos (módulos LoRa). Estos tres prototipos se instalarán en ubicaciones específicas: cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba.

Tabla 3-2: Ubicaciones de los prototipos de localización de descargas atmosféricas

UBICACIONES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		COORDENADAS GRADOS, MINUTOS Y SEGUNDOS	
	Latitud	Longitud	X	Y
Cerro CACHA	-1.69131	-78.715508	1°41'28.7"S	78°42'55.8"W
Cerro SAN FRANCISCO	-1.69647	-78.666721	1°41'47.3"S	78°40'00.2"W
RIOBAMBA	-1.648122	-78.675539	1°38'53.2"S	78°40'31.9"W

Realizado por: Jeison O, 2024

Utilizando la información de la Tabla 3-2, se realiza la ubicación y representación gráfica en el mapa de Node-Red del área máxima que abarcará el sistema de detección de descargas atmosféricas. Se tiene en cuenta que cada prototipo tiene un alcance máximo de detección de 40 km. Según se aprecia en la Ilustración 3-6, cada prototipo crea un radio circular, y la superposición entre ellos forma un área de detección que abarca aproximadamente 4126 km^2 .

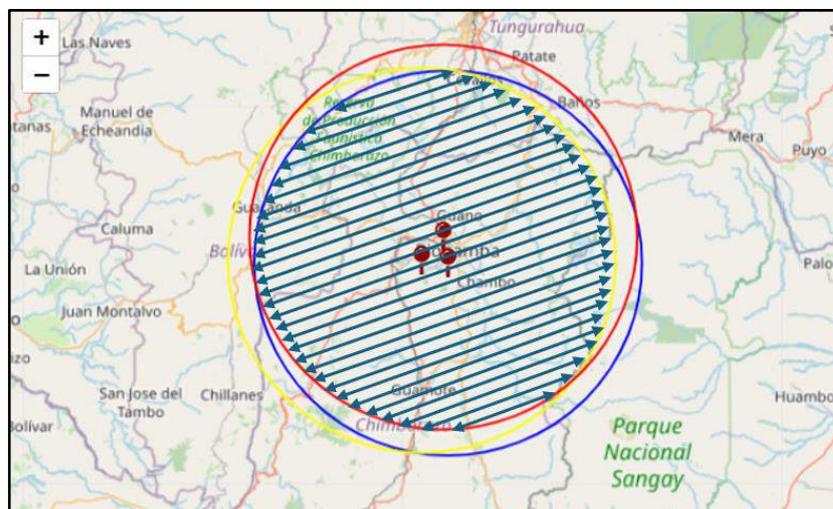


Ilustración 3-6: Área de cobertura para localización del rayo

Realizado por: Jeison O, 2024

3.4.2 Componentes del Prototipo

El prototipo de localización de descargas atmosféricas se compone por dos dispositivos: Modulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32 y el sensor de detección de descargas atmosféricas AS3935.

3.4.2.1 Modulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32

El módulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32 como se muestra en la Ilustración 3-7, es un dispositivo compacto y versátil diseñado para la comunicación de enlace que requieren conectividad LoRa en la banda de frecuencia distintas que son asignadas según la región (Robótica, 2022).

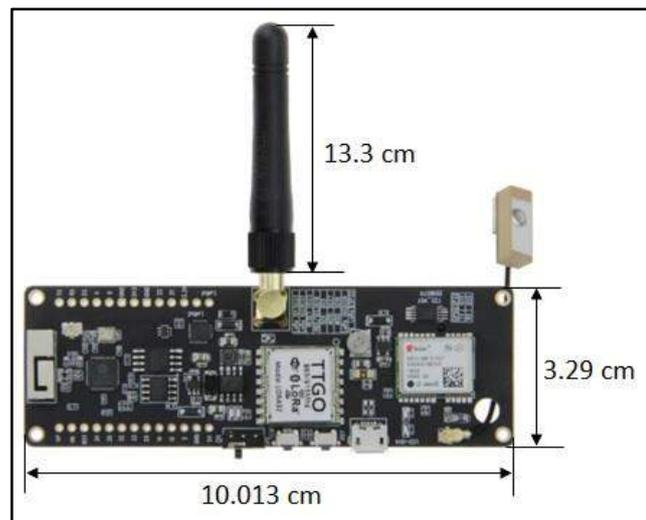


Ilustración 3-7: Modulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32

Realizado por: (ElectroStore, 2023 pág. 2)

3.4.2.2 Sensor AS3935

El sensor AS3935 es un circuito integrado diseñado para la localización de descargas atmosféricas como se muestra en la Ilustración 3-8, es capaz de proporcionar distancias de detección hasta un rango de 40 km con un margen de error de alrededor de 1 km, ya que sus datos son en números enteros. Cabe recalcar que dispone de una antena MA-5532 que detecta las ondas electromagnéticas de la luz del rayo que trabaja entre 500 kHz a 2MHz, como se detalla en la sección 2.7.2.

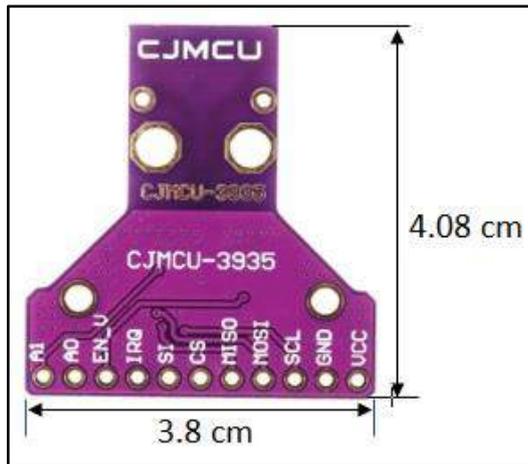


Ilustración 3-8: Sensor AS3935

Realizado por: (Amazon, 2024)

3.4.3 Diagrama de conexión de los Dispositivos

Una conexión efectiva entre los dispositivos es esencial para garantizar el correcto funcionamiento del prototipo de detección de descargas atmosféricas, como se ilustra en la Ilustración 3-9 en el diagrama de conexión.

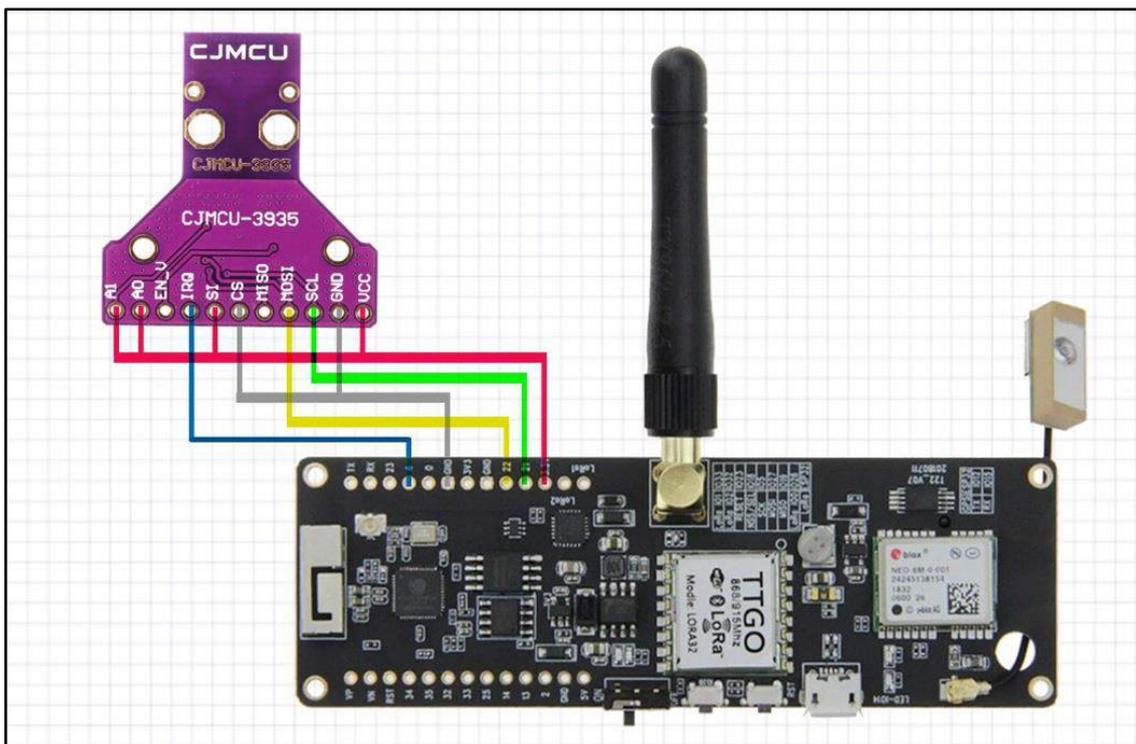


Ilustración 3-9: Diagrama de conexión del prototipo detector de rayos (descargas atmosféricas)

Realizado por: Jeison O, 2023

En la Ilustración 3-9 y la Tabla 3-3, se detalla la conexión entre la tarjeta de desarrollo ESP32 del módulo Lora y el sensor AS3935. Inicialmente, se proporciona una alimentación de 3.3V para el sensor AS3935. La comunicación se lleva a cabo a través del protocolo SPI, utilizando los pines digitales MOSI y SCL del sensor, y GPIO22 y GPIO21 del módulo. La información de detección se transmite a través de los pines digitales IRQ y GPIO4, respectivamente.

Tabla 3-3: Pines de conexión entre el módulo Lora-ESP32 y el sensor AS3935

	DISPOSITIVOS	
	Modulo Lora/ESP32	Sensor AS3935
PINES DE CONEXION	3.3 V	A1
		A0
		SI
		VCC
	GPIO21	SCL
	GPIO22	MOSI
	GND	CS
	GPIO4	IRQ

Realizado por: Jeison O, 2024

3.4.4 Programación

En la programación de la placa de desarrollo, se empleó la interfaz de Arduino junto con el lenguaje de programación C++. Inicialmente, se incorporan las bibliotecas vinculadas al sensor AS3935 y el módulo Lora mediante el cableado, la conexión Wi-Fi y el entorno necesario para el servidor Node Red. A continuación, se establecen los registros del sensor y se asignan los pines a utilizar en el módulo LoRaWAN. Además, se especifica la frecuencia de trabajo según la región correspondiente, como se indica en la Ilustración 3-10.

```
ReceptoraNoteRedOK3_2.ino
1 // ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
2 // FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRONICA
3 // ESCUELA DE TELECOMUNICACIONES
4
5 // AUTOR: JEISON ORTIZ - 754
6 // -----
7 // RECEPTORA - RIOBAMBA
8
9 // Ubicación Geografica: -1.648122, -78.675539
10
11 //Libraries for LoRa
12 #include <SPI.h>
13 #include <LoRa.h>
14 #include <Wire.h>
15 #include "SparkFun_AS3935.h"
16 #include <WiFi.h>
17 #include <ArduinoWebsockets.h> //
18 #include <WiFiClientSecure.h>
19 // #include <Adafruit_GFX.h>
20 // #include <Adafruit_SSD1306.h>
21
22 // -----
23 // 0x03 is default, but the address can also be 0x02, 0x01.
24 // Adjust the address jumpers on the underside of the product.
25 #define AS3935_ADDR 0x03
26 #define INDOOR 0x12
27 #define OUTDOOR 0xE
28 #define LIGHTNING_INT 0x08
29 #define DISTURBER_INT 0x04
30 #define NOISE_INT 0x01
31
```

Ilustración 3-10: Primera Parte de la programación en Arduino

Realizado por: Jeison O, 2024

Seguidamente se asignará mediante codificación los puertos de conexión del sensor AS3935 para que el módulo Lora tenga conectividad y trabajen en juntamente con la información. También en esta fracción se determina la frecuencia en la cual está trabajando el módulo Lora, según la región como se muestra en la siguiente Ilustración 3-11:

```
ReceptoraNodeRedOK3_2.ino
34 //define the pins used by the LoRa transceiver module
35 #define SCK 5
36 #define MISO 19
37 #define MOSI 27
38 #define SS 18
39 #define RST 14
40 #define DI00 26
41
42 //433E6 for Asia
43 //866E6 for Europe
44 //915E6 for North America
45 #define BAND 915E6
46
47 //-----
48 // Interrupt pin for lightning detection
49 const int lightningInt = 4;
50 //-----milis*-----
51 unsigned long tiempo;
52 unsigned long tiempo2=0;
53 unsigned long tiempox;
54 unsigned long tiempo2x=0;
55 // event issued by the lightning detector.
56 int intVal = 0;
```

Ilustración 3-11: Puertos asignados al sensor AS3935 y determina la Frecuencia de trabajo.

Realizado por: Jeison O, 2024

A continuación, se procede a introducir los datos de usuario y contraseña destinados a la conexión Wi-Fi entre el módulo LoRa/ESP32 y el Punto de Acceso. En relación con el sensor AS3935, se proporcionan los valores predeterminados de ruido y distorsión, los cuales serán útiles para la validación de la señal. Respecto al servidor Node-Red, se establece un nombre de usuario y una contraseña específicos, junto con una certificación de conexión exclusiva para el cliente desarrollador en la interfaz del servidor. En este espacio se almacenará la información relativa a la distancia del rayo, distorsión y ruido, como se muestra en la Ilustración 3-12.

```

ReceptoraNoteRedOK3_2.ino
62 String json;
63 //wireles coection
64 const char* ssid="GOLD";
65 const char* password="jeison012";
66 const char* websockets_connection_stringcs = "wss://raydetector.pktriot.net:443/cachasf";
67 const char* websockets_connection_stringf = "wss://raydetector.pktriot.net:443/fie";
68 //-----
69 const char echo_org_ssl_ca_cert[] PROGMEM = \
70 "-----BEGIN CERTIFICATE-----\n" \
71 "MIIDhTCCAwygAwIBAgIQI7dt48G7KxpRIh4I6rdk6DAKBggqhkJOPQQDAzCBiDEL\n" \
72 "MAkGA1UEBhMCVVMxEzARBgNVBAgTCk5ldyBKZXJzZXkxMDQyZTkwZWUwZDQy\n" \
73 "eSBDaXR5MR4wHAYDVQQKEzVUaGUgVW50bGUgVW50bGUgVW50bGUgVW50bGUg\n" \
74 "JVVTRVJUcnVzdCBFQ0MgQ2Vydg1maW5hdG1vbiBBdXR0b3JpdHkwHhcNMjMw\n" \
75 "MDAwMDAwMzAwMTI5MjM1OTU5WjBIMQswCQYDVQQGEwJBVDEQMA4GA1UEChMH\n" \
76 "WmVyb1NTTDEqMCGA1UEAxMhWmVyb1NTTDBFQ0MgRG9tYWluIFN1Y3VyZSBTaXR1\n" \
77 "IENBMHYeAYHKoZIzj0CAQYFK4EEACIDYgAENkFhFytTJe2qypTk1tpIV+9QuoRk\n" \
78 "gte7BRvWwYk9qUzn8QtVaGOCMBBfjwXsqivl8q1hs4wAYl03uNOXgFu7iZ7\n" \
79 "zFP6I6T3RB0+TR5fZqathfby47yOCZiAJI4go4IBdTCCAXEwHwYDVR0jBBgwFoAU\n" \
80 "OuEJhtTPGcKwdnRjdtzGncZjY5owHQYDVR0OBBYEFa9r5kv00Ueu9n6QHnnwMJGS\n" \
81 "yF+jMA4GA1UdDwEB/wQEAwIBhjASBgNVHRMBAf8ECDAGAQH/AgEAMB0GA1UdJQQW\n" \
82 "MBQGCCsGAQUFBwMBBggrBgEFBQcDAjAIBgNVHSAEGzAZMA0GCysGAQQBsjEBAgJ0\n"

```

Ilustración 3-12: Esclarecimiento de complementos de conectividad WiFi

Realizado por: Jeison O, 2024

La configuración inicial en la función VOID SETUP se ejecuta únicamente una vez y está destinada al sensor AS3935. En este contexto, se declara al Nodo Máster en modo de entrada digital (input) y se ajusta la configuración del sensor para su operación en entornos exteriores (outdoor). Para concluir, se establece la comunicación entre el nodo máster (receptor) y el nodo detector (transmisor), como se representa en la Ilustración 3-13.

```
ReceptoraNodeRedOK3_2.ino
100 void setup() {
101
102     //initialize Serial Monitor
103     Serial.begin(115200);
104     Serial.println("Nodo Master LoRa FIE-ESPOCH");
105     //-----
106     // Inicializacion del sensor AS3935
107     while (!Serial);
108
109     // When lightning is detected the interrupt pin goes HIGH.
110     pinMode(lightningInt, INPUT);
111     Serial.println("AS3935 Franklin Lightning Detector");
112     Wire.begin(); // Begin Wire before lightning sensor.
113
114     if( !lightning.begin() ) { // Initialize the sensor.
115         Serial.println ("Lightning Detector did not start up, freezing!");
116         while(1);
117     }
118     else
119         Serial.println("Schmow-Zold, Lightning Detector Ready!");
120     //-----
121     // Inicializacion de LoRa
122     //SPI LoRa pins
123     SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS);
124     //setup LoRa transceiver module
125     LoRa.setPins(SS, RST, D100);
126
127     if (!LoRa.begin(BAND)) {
128         Serial.println("Starting LoRa failed!");
129         while (1);
130     }
131     Serial.println("LoRa Inicializacion OK!");
132     // display.setCursor(0,10);
133     // display.print("Inicializacion OK!");
134     // display.display();
}
```

Ilustración 3-13: Configuración de enlace entre nodos

Realizado por: Jeison O, 2024

Finalmente, la configuración del ciclo repetitivo VOID LOOP, que se puede observar en la Ilustración 3-14, sigue el siguiente proceso: inicialmente, lee el pin de entrada lightningInt y lo compara con el valor HIGH (1 lógico); si esta condición se cumple, procede a leer y almacenar los datos de interrupción en una variable. A continuación, compara este valor con el registro LIGHTNING_INT, representado por 0x08; si se cumple esta condición, se interpreta que se ha detectado un rayo, y se lleva a cabo el cálculo de la distancia hasta la cabeza de la tormenta. Posteriormente, se envían los datos de distancia detectada a los canales designados en el servidor Node-Red para su almacenamiento. En caso de que el sensor detecte distorsión o ruido, estos datos también se envían y se almacenan en el servidor.

```

ReceptorNoteRedOK3_2.ino
164
165 void loop() {
166
167 //*****WS
168 client1.poll();
169 client3.poll();
170 //*****WS
171
172 tiempo=millis();
173
174 if(tiempo - tiempo2 >= 2000){
175 //json = "";
176 tiempo2=tiempo;
177
178 if(digitalRead(lightningInt) == HIGH){
179 // Hardware has alerted us to an event, now we read the interrupt register
180 // to see exactly what it is.
181 intVal = lightning.readInterruptReg();
182 if(intVal == NOISE_INT){
183 distancia=0;
184 //Serial.println("Ruido");
185 int dis=111;
186 //int ruido=0;
187 int disr=111;
188 int lora = 3;
189 json = "{\"lora\":\"" + String(lora) + "\",\"distancia\":\"" + String(disr) + "\",\"dc\":\"" + String(dis) + "\",\"ruido\":\"" + String(distancia)+"}";
190 client3.send(json);
191 //Serial.println(json);
192 //delay(1000);
193 }
194 else if(intVal == DISTURBER_INT){
195 //Serial.println("Distorsion");
196 distancia=50;
197 //int dis=111;
198 int ruido=111;
199 int disr=111;
200 int lora = 3;
201 json = "{\"lora\":\"" + String(lora) + "\",\"distancia\":\"" + String(disr) + "\",\"dc\":\"" + String(distancia) + "\",\"ruido\":\"" + String(ruido)+"}";
202 client3.send(json);
203 //Serial.println(json);
204 //delay(1000);
205 // Too many disturbers? Uncomment the code below, a higher number means better
206 // disturber rejection.
207 //lightning.watchdogThreshold(threshVal);
208 }
209 else if(intVal == LIGHTNING_INT){
210 //Serial.println("Rayo Detectado");
211 // Lightning! How far away is it? Distance estimation takes into
212 // account any previously seen events in the last 15 seconds.
213 byte distancia = lightning.distanceToStorm();
214 //Serial.print("Aproximadamente: ");
215 //Serial.print(distancia);
216 //Serial.println("km");
217
218 int dis=111;
219 int ruido=111;
220 //int disr=111;
221 int lora = 3;
222 json = "{\"lora\":\"" + String(lora) + "\",\"distancia\":\"" + String(distancia) + "\",\"dc\":\"" + String(dis) + "\",\"ruido\":\"" + String(ruido)+"}";
223 client3.send(json);
224 //Serial.println(json);
225 //delay(1000);
226 }
227 }
228 // delay(1000); // Slow it down.
229 // -----
230 if(digitalRead(lightningInt) == LOW){
231 //Serial.println("No hay descarga ");
232 int dis=111;
233 int ruido=111;
234 int disr=111;
235 int lora = 3;
236 //String json = "{\"lora\":\"" + String(lora) + "\",\"distancia\":\"" + String(disr) + "\",\"dc\":\"" + String(dis) + "\",\"ruido\":\"" + String(ruido)+"}";
237 json = "{\"lora\":\"" + String(lora) + "\",\"distancia\":\"" + String(disr) + "\",\"dc\":\"" + String(dis) + "\",\"ruido\":\"" + String(ruido)+"}";
238 client3.send(json);
239 //Serial.println(json);
240 //delay(1000);
241 }
242 //Serial.println(json);
243 }

```

Ilustración 3-14: Configuración de Ruido, distorsión y detección del rayo

Realizado por: Jeison O, 2024

Dado que las descargas eléctricas no ocurren de manera constante, se ha implementado un ciclo de reconexión en caso de que el enlace de comunión falle. Es importante señalar que se han incorporado varios retardos en la programación con el objetivo de evitar la saturación del módulo

LoRa durante cada proceso que lleva a cabo. Este enfoque asegura que la comunicación sea restablecida de manera adecuada y eficiente en situaciones donde no se detecten descargas eléctricas.

3.4.5 Diseño del Prototipo para la detección de descargas atmosféricas

3.4.5.1 Conectividad de dispositivos

La conexión entre el módulo LoRa y el sensor AS3935 es un aspecto crítico para el correcto funcionamiento del prototipo de detección de descargas atmosféricas. Es por esta razón que se ha diseñado el sistema priorizando la eficiente interconexión de estos dos componentes para asegurar su funcionalidad óptima como se muestra en la Ilustración 3-15.

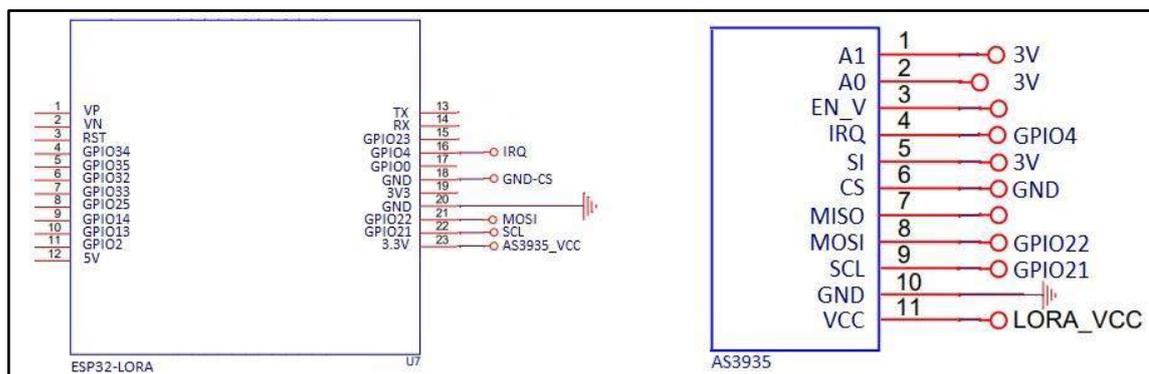


Ilustración 3-15: Conexión entre el dispositivo Lora y el sensor AS3935

Realizado por: Jeison O, 2024

En un primer plano, se ha llevado a cabo un diseño detallado que garantiza la correcta disposición de los cables y pines, asegurando una conexión estable y libre de interferencias entre el módulo LoRa y el sensor AS3935. Este enfoque busca minimizar posibles errores de conexión que podrían afectar el intercambio de información crucial entre ambos componentes.

Además, se han implementado pruebas y verificación durante el proceso de diseño para asegurar que la conexión entre el módulo LoRa y el sensor AS3935 sea fiable y consistente. Esto implica su correcta funcionalidad para detectar posibles problemas de conexión antes de la implementación final del prototipo

3.4.5.2 Diseño del prototipo

El diseño del prototipo de localización de descargas atmosféricas ha considerado varios elementos esenciales para garantizar su funcionamiento óptimo, teniendo en cuenta que estará expuesto a condiciones climáticas adversas, se ha prestado especial atención a la selección de materiales resistentes y duraderos que puedan soportar la exposición prolongada al sol, esto asegura la integridad estructural del prototipo a lo largo del tiempo y minimiza los efectos negativos de la radiación solar, como el deterioro de los componentes.

Además, se han incorporado medidas de protección contra las fuertes lluvias para salvaguardar los componentes electrónicos y garantizar un funcionamiento fiable incluso en condiciones climáticas adversas. Los dispositivos Lora están protegidos por una caja plasta impermeable, recubrimientos resistentes al agua y los sensores AS3935 están dentro de un frasco de vidrio colocados pequeñas bolsas de silicio para prevenir la entrada de humedad y proteger los circuitos internos como se muestran en la Ilustración 3-16.

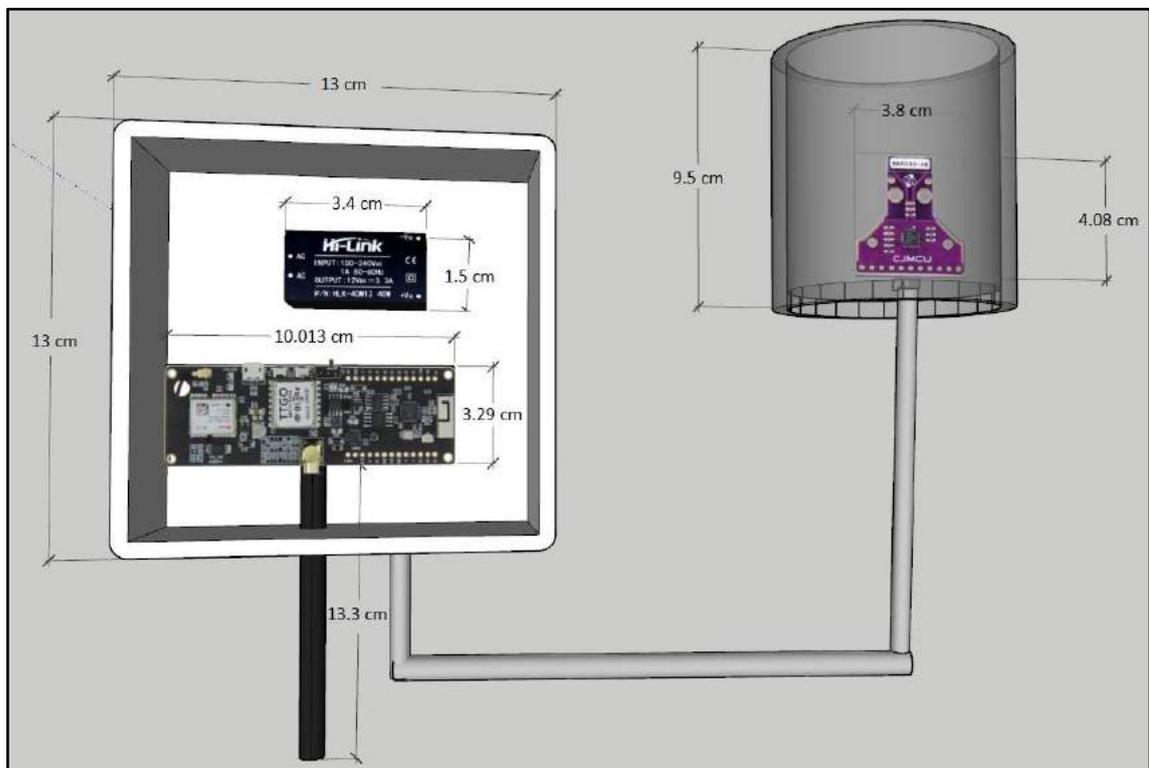


Ilustración 3-16: Diseño del prototipo de localización de descargas atmosféricas

Realizado por: Jeison O, 2024

La robustez del prototipo se ha considerado crucial para su desempeño efectivo, asegurando que pueda mantenerse operativo bajo diversas condiciones climáticas. La implementación de una caja plástica IP64 resistente a la intemperie y el uso de materiales adecuados contribuyen a la durabilidad y confiabilidad del sistema.

3.4.5.3 Enlace de módulos LoRaWAN utilizando el software radio Mobile

Para un buen enlace entre nodos LoraWan debe mantenerse libre de obstáculos para poder transmitir la máxima potencia desde un punto A hasta un punto B, la línea de visión directa entre los nodos es fundamental para un enlace LoRaWAN eficiente. Cuantos menos obstáculos haya entre los nodos, mejor será la calidad de la conexión.

En colaboración con la empresa SITCOM que ya posee infraestructura, especialmente torres de comunicación en lugares estratégicos como el cerro Cacha y el cerro San Francisco, puede ser beneficiosa para implementar una red LoRaWAN en esa área.

- **Enlace Cerro Cacha Hacia Riobamba:** Para el estudio se escogió el cerro Cacha debido a que es el cerro referente de la ciudad de Riobamba. Este cerro presenta la ventaja de tener una elevación superior en comparación con el cerro San Francisco. En el perfil del terreno entre el cerro Cacha y la ciudad de Riobamba, no hay obstáculos que pudieran limitar la conexión, y la altura del cerro no representa un inconveniente. Por esta razón, se plantea implementar el prototipo de localización de descargas atmosféricas en este cerro. La Tabla 3-4 proporciona los datos de ubicación para ambos nodos, tanto el nodo 1 de transmisión (cerro Cacha) como el nodo máster de recepción (Riobamba).

Tabla 3-4: Ubicación y altura en donde se va a implementar los prototipos.

NODO 1 Tx (Cerro Cacha)			NODO MÁSTER Rx (Riobamba)		
Altura de la Torre	Ubicación		Altura de la Torre	Ubicación	
3 m	Latitud	Longitud	10 m	Latitud	Longitud
	-1.69131	-78.715508		-1.648122	-78.675539

Realizado por: Jeison O, 2024

En la Ilustración 3-17 se puede observar que se tiene línea de vista directa entre el prototipo del cerro Cacha y el prototipo en la ciudad de Riobamba ubicado al Norte en un domicilio, además se debe destacar que se tiene 65,7 dB por encima del umbral de recepción del equipo, con una distancia de 6,54Km, la fuerza de la señal que nos llega al receptor es de -110,9 dBm, Con una

zona de Fresnel de 1,8 F1 y considerando el rango de Frecuencia de 902 – 928 MHz en la que trabaja el módulo LoRa, siendo propicio para un buen enlace.

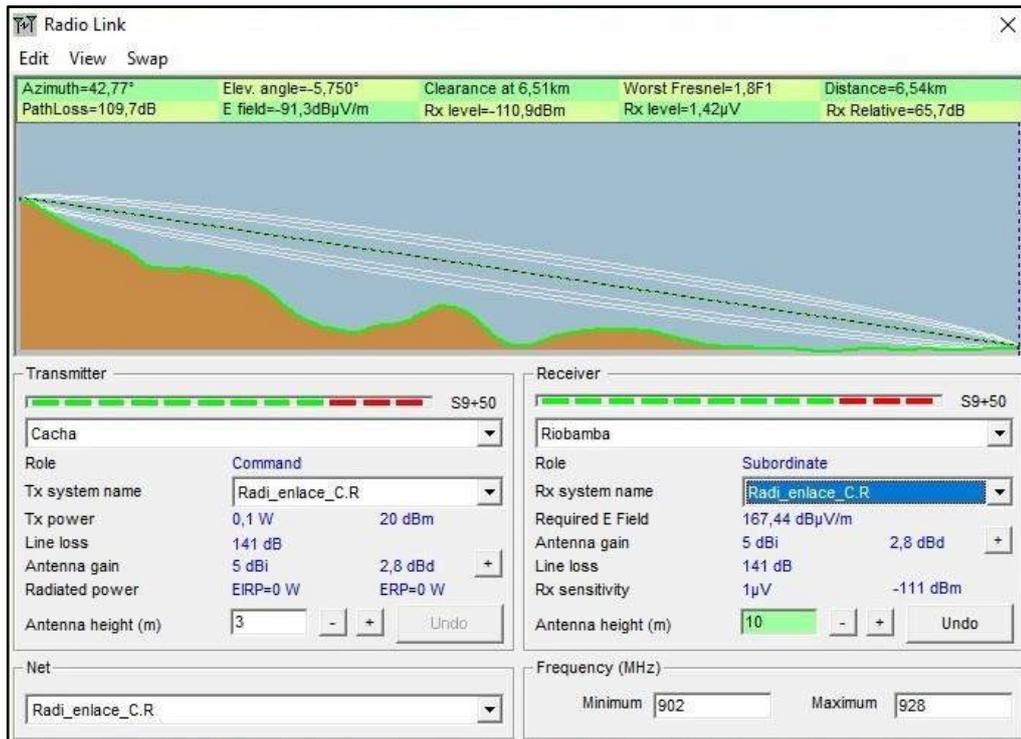


Ilustración 3-17: Enlace desde el nodo 1 (cerro Cacha) hacia el nodo máster (Riobamba)

Realizado por: Jeison O, 2024

- **Enlace cerro San Francisco hacia Riobamba:** Se seleccionó el cerro San Francisco para el estudio debido a que su área abarca la ciudad de Riobamba y sus mediaciones. Este cerro tiene la ventaja de contar con una elevación adecuada. En el perfil del terreno entre el cerro San Francisco y la ciudad de Riobamba, no hay obstáculos que puedan obstaculizar la conexión, y la altura del cerro no supone un inconveniente. Por esta razón, se plantea implementar el prototipo de localización de descargas atmosféricas en este cerro. En la Tabla 3-5 se proporcionan los datos de ubicación para ambos nodos, tanto el nodo 2 de transmisión (cerro San Francisco) como el nodo máster de recepción (Riobamba).

Tabla 3-5: Ubicación y Altura en donde se va a implementar los prototipos

NODO 2 Tx (Cerro San Francisco)			NODO MÁSTER Rx (Riobamba)		
Altura de la Torre	Ubicación		Altura de la Torre	Ubicación	
7 m	Latitud	Longitud	10 m	Latitud	Longitud
	-1.69647	-78.666721		-1.648122	-78.675539

Realizado por: Jeison O, 2024

En la Ilustración 3-18 se puede observar que se tiene línea de vista directa entre el prototipo del cerro San Francisco y el prototipo en la ciudad de Riobamba ubicado al Norte en un domicilio, además se debe destacar que se tiene 4,3 dB por encima del umbral de recepción del equipo, con una distancia de 5,46Km, la fuerza de la señal que nos llega al receptor es de -102,9 dBm, Con una zona de Fresnel de 1,2 F1 y considerando el rango de Frecuencia de 902 – 928 MHz en la que trabaja el módulo LoRa, siendo propicio para un buen enlace.

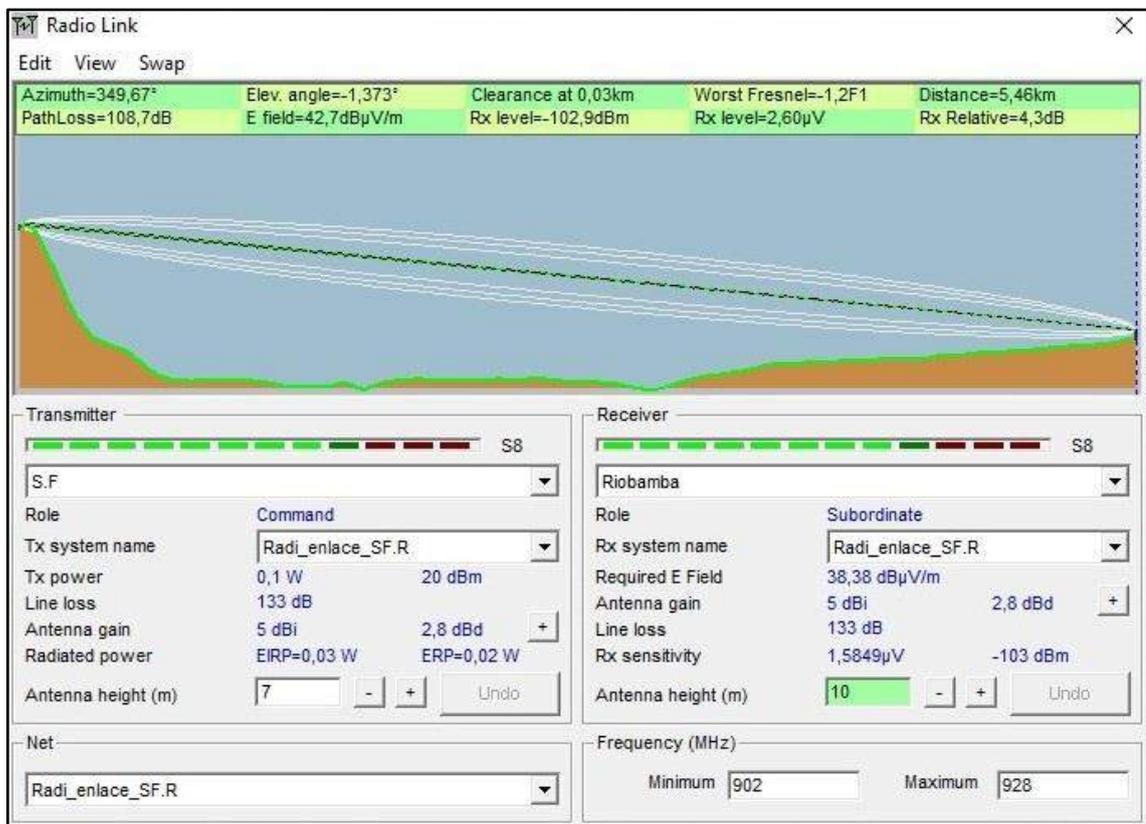


Ilustración 3-18: Enlace desde el nodo 2 (cerro San Francisco) hacia el nodo máster (Riobamba)
 Realizado por: Jeison Ortiz, 2024

3.5 Implementar el prototipo de descargas atmosféricas para la localización de caída del rayo en el cantón Riobamba y sus mediaciones utilizando el método de multiestación, mediante la interconexión entre módulos LoraWan

Este segmento involucra una serie de parámetros iniciales que definen la correcta configuración para el funcionamiento del prototipo de localización de rayos, con el objetivo de evitar el uso innecesario de recursos. En primer lugar, se examinan los requisitos del prototipo. A continuación, se establece un esquema general como una representación visual para facilitar la comprensión del funcionamiento del prototipo. Luego, se procede a instalar cada prototipo en las ubicaciones

especificadas en la Tabla 3-2. Posteriormente, se verifica el correcto funcionamiento y enlace de los módulos LoRa y del sensor con la conexión al punto de acceso en el nodo máster. Después de realizar estas etapas, se examinan los datos en el servidor Node-Red y se lleva a cabo su procesamiento para obtener la información sobre el punto de caída del rayo en coordenadas geográficas, la cual se almacena en el mismo servidor. Finalmente, se presenta de manera gráfica la información sobre los rayos captados a lo largo del tiempo, organizada por año, mes y día. Este enfoque permite que cualquier usuario interesado pueda acceder a la información de los rayos y visualizarla de manera intuitiva.

3.5.1 *Requerimientos del Prototipo*

Esta sección tiene como propósito detallar la forma de cumplir con las necesidades del prototipo de localización de descargas atmosféricas. En este sentido, se presentan de manera general los requisitos funcionales y no funcionales, señalando específicamente cuáles de estos parámetros son relevantes para el Trabajo de Titulación actual.

3.5.1.1 *Características Operables*

- **Método de Monitoreo:** El sistema de monitoreo se fundamenta en la recopilación de datos provenientes de los sensores AS3935.
- **Sistema de Notificación:** Dentro del sistema, no se incluye un mecanismo de notificación, ya que el sistema es autónomo.
- **Sistema de Evaluación:** Durante este proceso, se examinan los datos almacenados en el servidor Node-Red de manera que las distancias proporcionadas por el sensor AS3935 sean aprovechadas para aplicar el método de multiestación y, posteriormente, generar un gráfico que represente la caída del rayo.
- **Sistema de Respuesta:** La respuesta a través de actuadores se activa para todos los usuarios que accedan a la información del sistema de detección de rayos, la cual se ofrece de forma pública mediante la web.
- **Sistema de Regulación:** Para gestionar la información recopilada, se implementó un código dentro de cada módulo LoRa que establece la conexión y realiza una reconexión Wi-Fi periódica, evitando posibles pérdidas tanto de enlace como de conexión. Además, se incorporaron baterías para asegurar el funcionamiento continuo de los dispositivos en caso de cortes de energía eléctrica.

3.5.1.2 Características no Operables

- **Retardo/Latencia:** La latencia en un módulo LoRaWAN puede variar dependiendo de varios factores, como la configuración de la red, la distancia entre los nodos, la carga de la red y la implementación específica del dispositivo. En general, las tecnologías LoRa y LoRaWAN están diseñadas para ofrecer bajos consumos de energía y largo alcance, pero a costa de una menor velocidad de transmisión y, por lo tanto, pueden tener latencias más altas en comparación con tecnologías que priorizan la velocidad de transmisión.
- **Rendimiento del protocolo LoRaWAN:** La velocidad máxima de datos es de 1.2K ~ 300Kbps, debido a que el protocolo LoRaWAN tiene una potencia de transmisión de + 20 dBm y una sensibilidad de recepción de -139 dBm, permitiendo así la comunicación sobre distancias considerables tanto en entornos rurales como urbanos.
- **Rendimiento del protocolo 802.11 b/g/n:** La velocidad de transmisión aún no ha sido medida, aunque se estima teóricamente una velocidad de 10 Mbps. Esto se basa en la alta tasa de transmisión del protocolo 802.11 b/g/n. No obstante, es importante tener en cuenta que la velocidad máxima del servicio de Internet WiFi en el hogar es de 40 Mbps. Además, se anticipa que el rendimiento del sistema podría verse afectado debido a la presencia de múltiples dispositivos utilizando la red simultáneamente.
- **Duración de Vida:** Este parámetro se establece considerando la vida útil de cada dispositivo, lo que lleva a la conclusión de que el prototipo de detección de descargas atmosféricas operará de manera eficiente durante un período estimado de entre 3 a 4 años.
- **Disponibilidad del Sistema:** La confiabilidad de este sistema se fundamenta en el funcionamiento adecuado de cada prototipo y en el nivel de detección simultánea entre los tres dispositivos. Además, se asegura la disponibilidad, ya que se pueden implementar desarrollos de programación en el módulo LoRa dentro del propio prototipo en el futuro para mejorar los parámetros de detección.

3.5.1.3 Requerimientos Complementarios

- **Evaluación ante Fallos:** En situaciones de fallos en el sistema de comunicación, es necesario implementar una operación que detecte y recupere la información perdida para garantizar la integridad de los datos.
- **Flexibilidad:** Actualmente, el sistema exhibe adaptabilidad en entornos que poseen características de fuente eléctrica y puede integrarse fácilmente con nuevas tecnologías sin inconvenientes a nivel de la capa de aplicación.

- **Movilidad:** En este contexto, el prototipo de localización de descargas atmosféricas es portátil siempre que las baterías estén en buen estado. En caso contrario, el prototipo debe ser fijo y conectado directamente a una fuente de voltaje.

3.5.2 Diagrama General del Prototipo de localización de descargas atmosféricas utilizando el método de multiestación

En la Ilustración 3-19, se presenta el funcionamiento del prototipo de localización de descargas atmosféricas dividido en etapas. Es importante destacar que cada número dentro de esta ilustración representa una actividad específica.

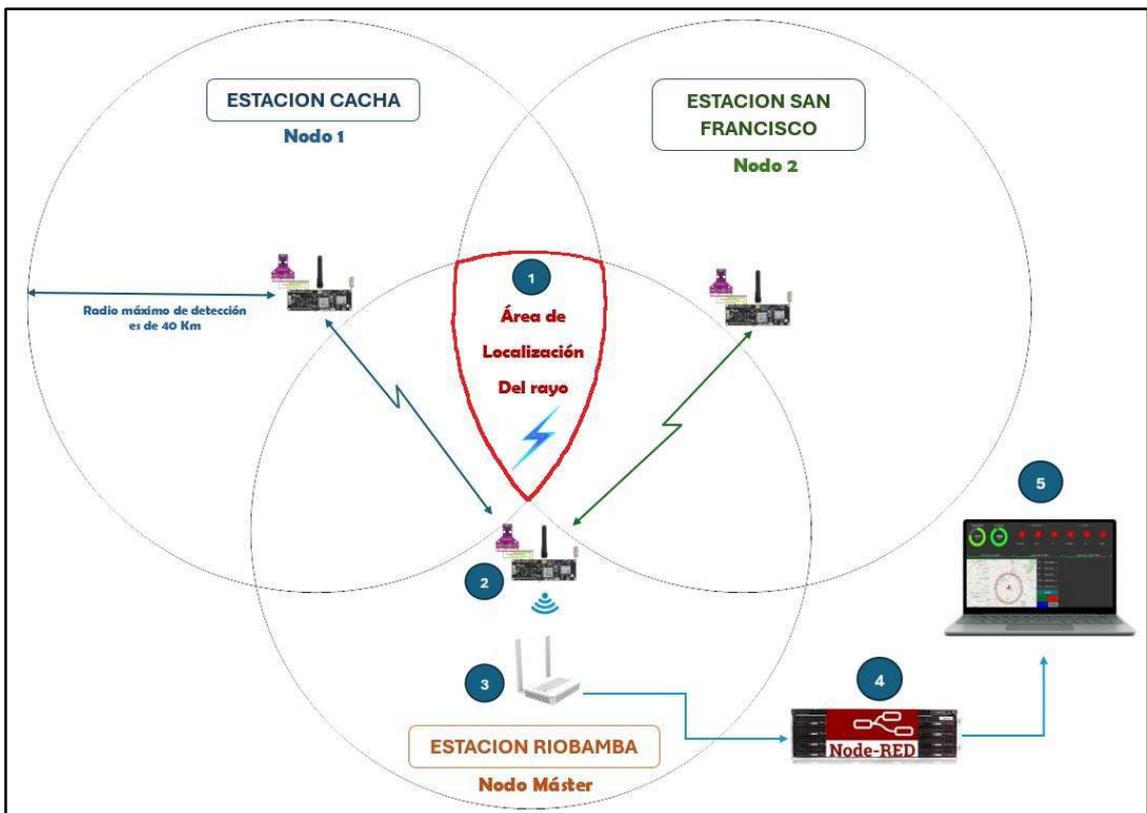


Ilustración 3-19: Diagrama del Prototipo de Localización de descargas atmosféricas.

Realizado por: Jeison O, 2024

- **Etapa 1:** Se refiere al rango geográfico afectado por la caída de rayos en la región de investigación, previamente examinado con una extensión aproximada de 4126 km^2 según lo expuesto en la Sección 3.4.1.

- **Etapa 2:** Se trata de la recopilación y procesamiento de datos llevados a cabo por el módulo LoRaWAN (nodo máster) de los nodos uno y dos a través de la tarjeta de desarrollo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32.
- **Etapa 3:** Hace referencia al envío de esta información al Punto de Acceso (Access Point) a través de Wi-Fi.
- **Etapa 4:** Señala la transferencia de los datos recolectados de los nodos uno, dos y tres hacia el servidor Node-Red con el propósito de su procesamiento y almacenamiento.
- **Etapa 5:** Hace alusión al procesamiento de estos datos utilizando el panel de control (dashboard) de Node-Red con el fin de visualizar los resultados obtenidos en un ordenador.

3.5.3 Almacenamiento de Datos obtenidos

En la Ilustración 3-20 se presentan los registros recopilados en Node-Red por los sensores ubicados en cada estación (nodo) instalada. Estos registros incluyen información sobre la latitud, longitud y distancia que capta cada nodo, también representa el punto que se detectó la descarga atmosférica (rayo), mostrando la ubicación en coordenadas geográficas.

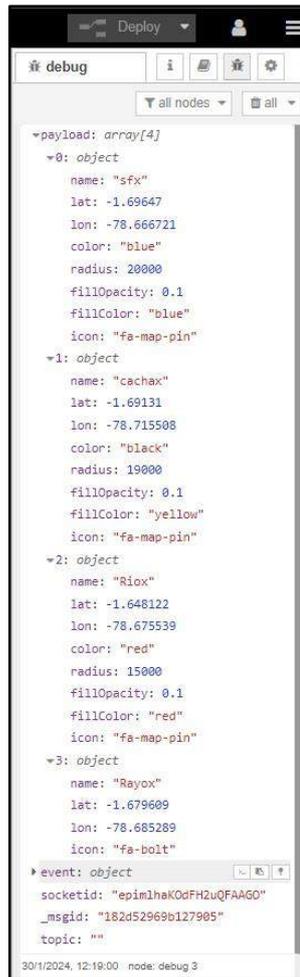


Ilustración 3-20: Registros almacenados en el servidor Node-Red de todas las Estaciones (nodos)

Realizado por: Jeison O, 2024

En la Ilustración 3-21, se logra identificar los datos obtenidos por el sensor AS3935, como la fecha (año-mes-día), en este caso es del 2024-01-12, en donde se ha captado dos detecciones de rayo, la primera es a las 14:01:24 y la segunda es a las 14:39:46. Por otro lado, se logra observar la distancia en el nodo Cacha, la primera detección es de 19 Km y la segunda detección es de 23 km, las distancias en el nodo San Francisco, la primera detección es de 20 km y la segunda detección es de 24 km y las distancias en el nodo Riobamba, la primera detección es de 15 km y la segunda detección es de 19 km. Todos estos datos se almacenarán en el servidor Node-Red y se podrán visualizar los datos detectados y las próximas detecciones.

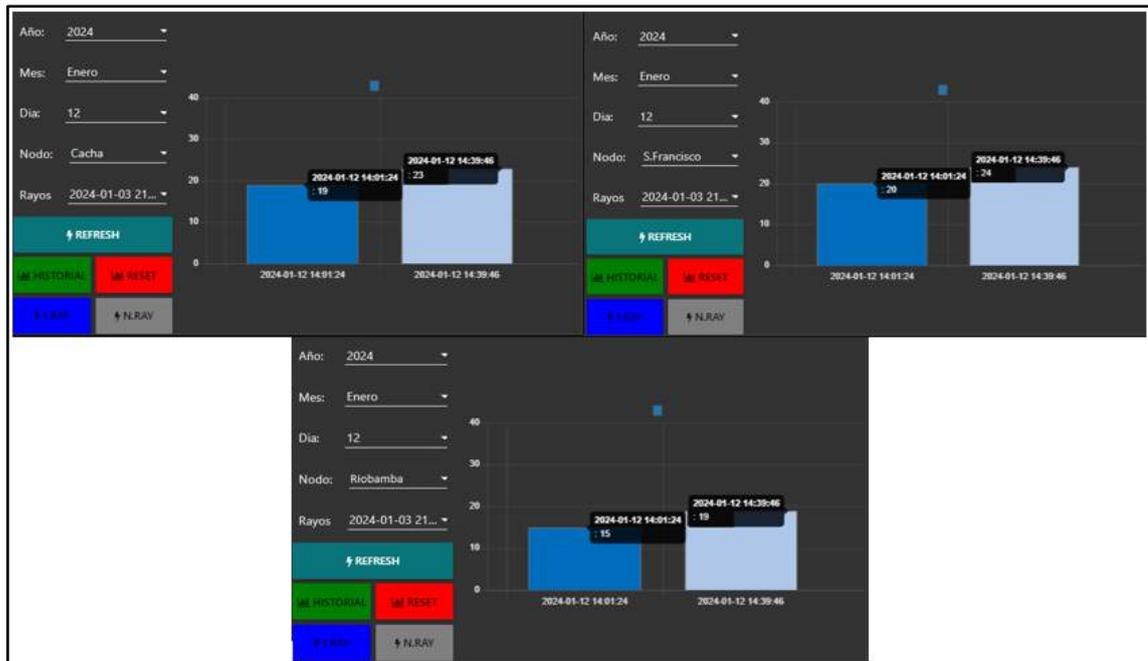
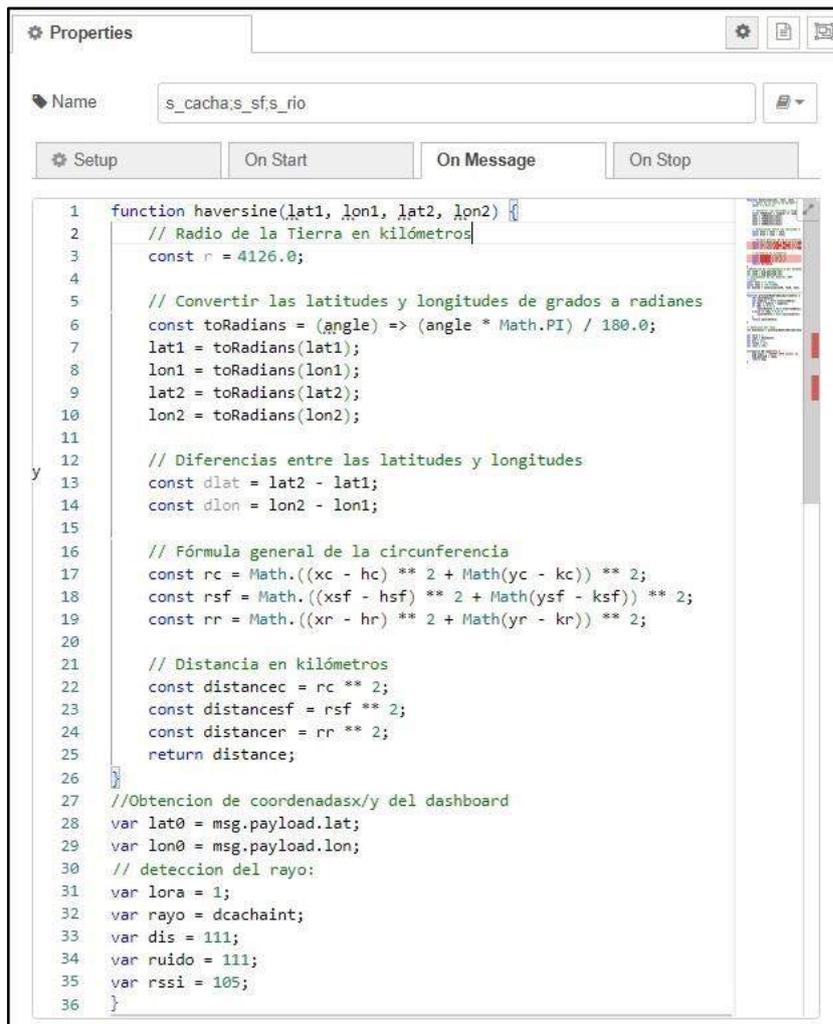


Ilustración 3-21: Registros almacenados en el servidor Node-Red de todas las Estaciones (nodos)

Realizado por: Jeison O, 2024

3.5.4 *Procesamiento de Datos*

Una vez que se adquieren los datos de cada prototipo (nodo), como se muestra en la Ilustración 3-20, se procede al cálculo del punto de impacto del rayo en coordenadas como se muestra en la Ilustración 3-22, teniendo en cuenta la información previa que incluye la ubicación de cada prototipo y la distancia obtenida por cada uno de los prototipos. Este cálculo se realiza mediante la ecuación general de la circunferencia y la técnica de determinación del punto de intersección entre tres circunferencias, también conocida como el método de multiestación (ver sección 3.2.1). Este proceso genera seis puntos de intersección. Posteriormente, se lleva a cabo una comparación entre estos puntos, permitiendo filtrar aquellos que se encuentran en proximidad, y calculando el promedio de sus coordenadas. Finalmente, el punto estimado y preciso de la caída del rayo se representa en el mapa del panel de control (dashboard), y su ubicación exacta se almacena.



```
1 function haversine(lat1, lon1, lat2, lon2)
2 // Radio de la Tierra en kilómetros
3 const r = 4126.0;
4
5 // Convertir las latitudes y longitudes de grados a radianes
6 const toRadians = (angle) => (angle * Math.PI) / 180.0;
7 lat1 = toRadians(lat1);
8 lon1 = toRadians(lon1);
9 lat2 = toRadians(lat2);
10 lon2 = toRadians(lon2);
11
12 // Diferencias entre las latitudes y longitudes
13 const dlat = lat2 - lat1;
14 const dlon = lon2 - lon1;
15
16 // Fórmula general de la circunferencia
17 const rc = Math.((xc - hc) ** 2 + Math(yc - kc) ** 2);
18 const rsf = Math.((xsf - hsf) ** 2 + Math(ysf - ksf) ** 2);
19 const rrr = Math.((xr - hr) ** 2 + Math(yr - kr) ** 2);
20
21 // Distancia en kilómetros
22 const distancec = rc ** 2;
23 const distancsf = rsf ** 2;
24 const distancer = rrr ** 2;
25 return distance;
26
27 //Obtencion de coordenadasx/y del dashboard
28 var lat0 = msg.payload.lat;
29 var lon0 = msg.payload.lon;
30 // deteccion del rayo:
31 var lora = 1;
32 var rayo = dcachaint;
33 var dis = 111;
34 var ruido = 111;
35 var rssi = 105;
36 }
```

Ilustración 3-22: Procesamiento de datos en el servidor Node-Red

Realizado por: Jeison O, 2024

Toda la información obtenida en el servidor Node-Red, se lo representa código ya que es un formato de intercambio de datos ligero y de fácil lectura que se utiliza para la transmisión de datos entre un servidor y una aplicación web, o entre diferentes partes de una aplicación. Aunque tiene "JavaScript" en su nombre, es un formato de lenguaje independiente y es utilizado en este entorno de programación. También en el servidor Node-RED, los nodos representan unidades de funcionalidad o bloques de construcción dentro de un flujo de trabajo como se muestra en la Ilustración 3-23. Cada nodo está configurado para realizar una tarea específica y se conecta a otros nodos para facilitar la transferencia de datos o ejecutar acciones específicas en respuesta a eventos con funcionalidades importantes para la localización de descargas atmosféricas.

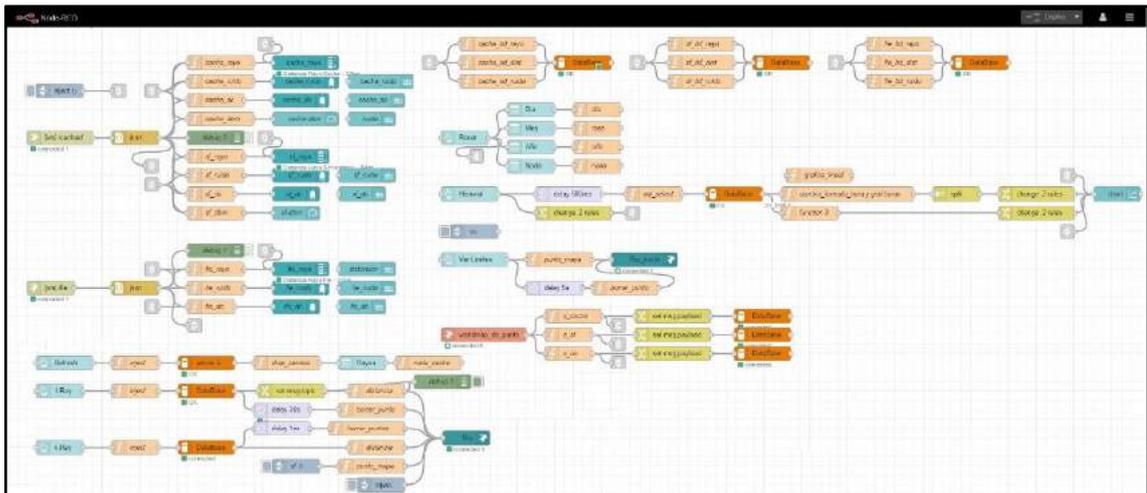


Ilustración 3-23: Procesamiento de datos en el servidor Node-Red

Realizado por: Jeison O, 2024

3.5.4.1 Dashboard

Con todos los datos obtenidos, en el dashboard (panel de control) que se encuentra en la ilustración 3-24, se podrá visualizar la potencia de recepción en el nodo máster que se encuentra en el domicilio de la ciudad de Riobamba, tanto del nodo Cacha como del nodo San Francisco en dBm. También se encuentran puntos led para identificar si existe distorsión o ruido por parte de los tres nodos. Además, cuenta con un mapa en donde puede observar el rango de detección y el punto de caída del rayo. Finalmente, consta de un panel en donde se puede elegir el año, mes, día, nodo y rayo que ha sido captado, para poder ser representado mediante una gráfica y el mapa. Cabe mencionar que existe un botón llamado histórico en donde se grafican todos los rayos captados por mes.

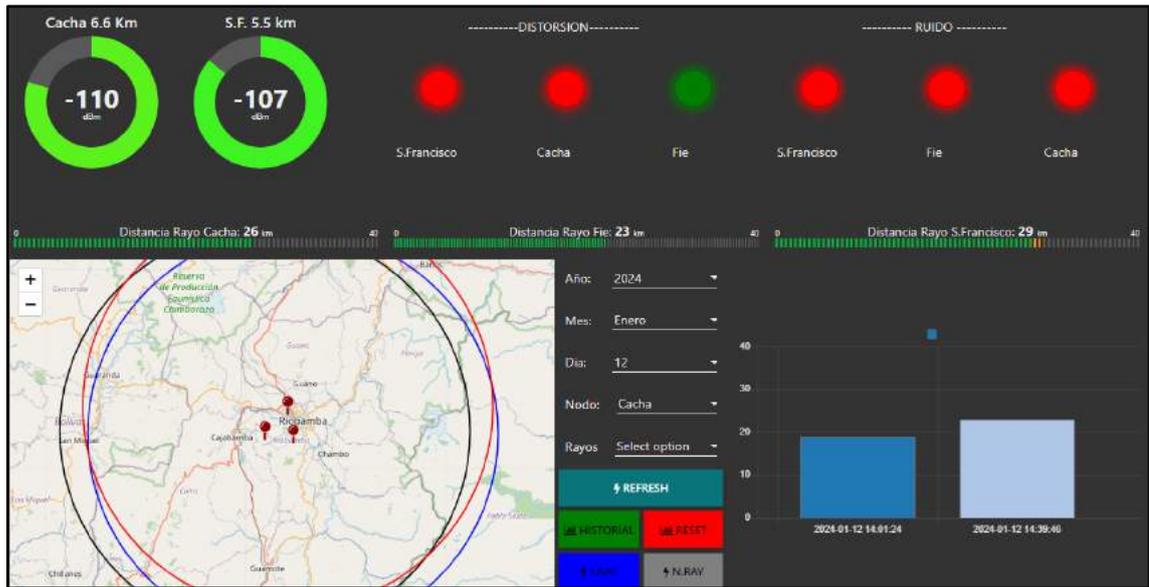


Ilustración 3-24: Dashboard de detección de descargas atmosféricas

Realizado por: Jeison O, 2024

3.6 Realizar pruebas del funcionamiento del prototipo de descargas atmosféricas para la localización del rayo

En esta sección, se procede a realizar pruebas de la obtención de la localización de descargas atmosféricas (rayo) con el método de multiestación, como se muestra en la Ilustración 3-25, por parte de los tres prototipos previamente funcionales, refleja la ubicación de cada nodo instalado, la distancia detectada en km, año, mes, día y la hora en la que detecto el rayo, con la utilización del servidor Node-Red.



Ilustración 3-25: Distancias detectadas por los tres prototipos

Realizado por: Jeison O, 2024

En este caso se muestra que los datos captados son, el día 05 de enero de 2024 a las 22:42:14h. El prototipo de Cacha ha obtenido una distancia de 8 km, el prototipo San Francisco una distancia de 11 km y el prototipo de Riobamba a una distancia de 8 km como es muestra en la Ilustración 3-25. Es importante mencionar que se pueden visualizar las ubicaciones en coordenadas geográficas de cada uno de los prototipos.

A continuación, mediante el método de multiestación, se gráfica en el mapa la intersección entre los tres radios circulares. Luego, se calcula la coordenada geográfica del punto de la caída del rayo detectado en la ciudad de Riobamba y sus mediaciones, dándonos como resultado una latitud de -1.628535 y longitud de -78741241. Para finalmente ser visualizado en el mapa del dashboard como se muestra en la Ilustración 3-26.

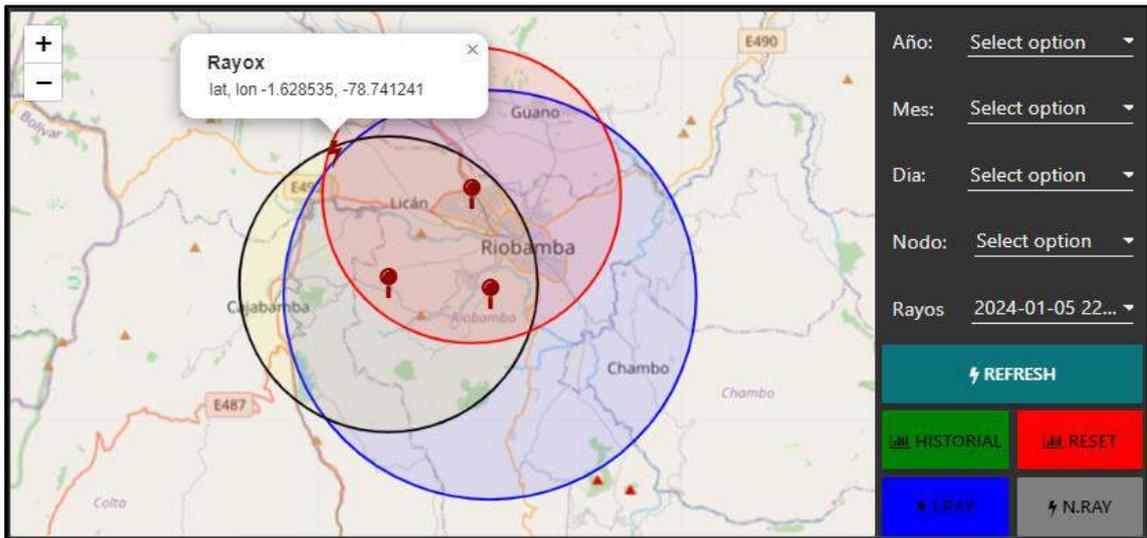


Ilustración 3-26: Ubicación de la caída del rayo (primer evento evento)

Realizado por: Jeison O, 2024

En el siguiente evento se muestra que los datos captados son de dos descargas atmosféricas, el en año dos mil veinte y cuatro, mes enero, día doce a las 14:01:24h el primer rayo y a las 14:39:46h el segundo rayo. El prototipo de Cacha ha obtenido una distancia de 19 km el primer rayo y de 23 km el segundo rayo, el prototipo San Francisco una distancia de 20 km el primer rayo y de 24 km el segundo rayo por último el prototipo de Riobamba a una distancia de 15 km el primer rayo y 19 km el segundo rayo, como es muestra a continuación en la Ilustración 3-27.

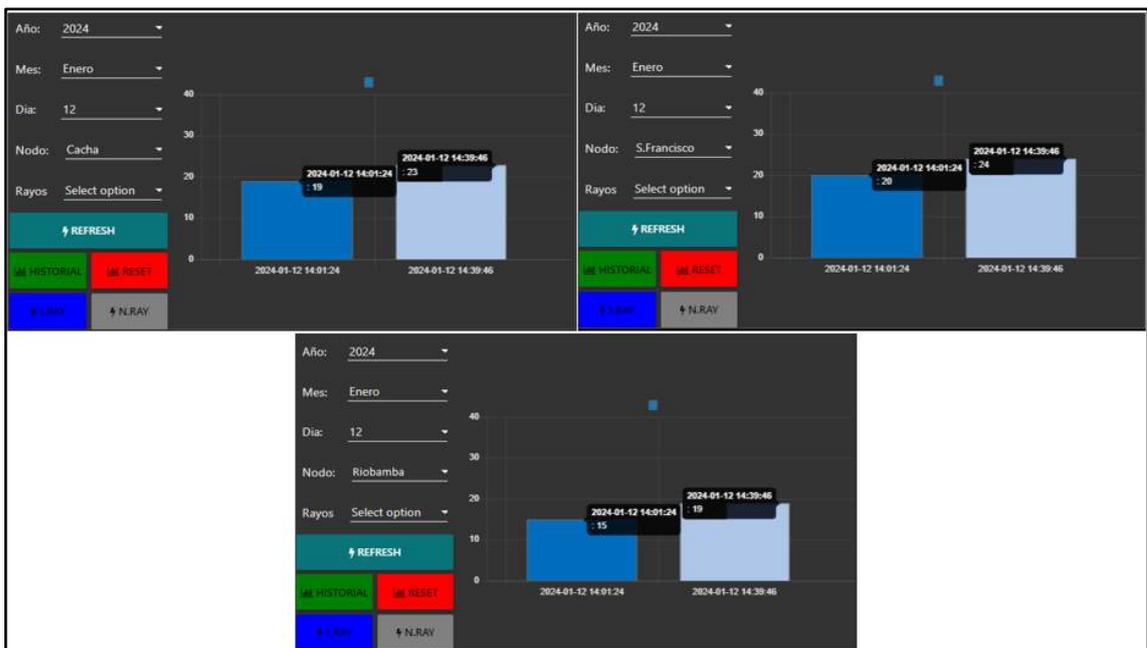


Ilustración 3-27: Distancias detectadas por los tres prototipos (segundo evento)

Realizado por: Jeison O, 2024

Una vez obtenida las detecciones de cada uno de los prototipos, mediante el método de multiestación, se gráfica en el mapa la intersección entre los tres radios circulares. Luego, se calcula la coordenada geograficas del punto de la caída del rayo detectado tanto del primer rayo como del segundo, situados en la ciudad de Riobamba y sus mediaciones, obteniendo la localización del primer rayo con una latitud de -1.523768, longitud de -78.717812 y del segundo rayo con una latitud de -1.488892 y una longitud de -78.728111. Para finalmente ser visualizado en el mapa del dashboard como se muestra en las Ilustraciones 3-28 y 3-29.

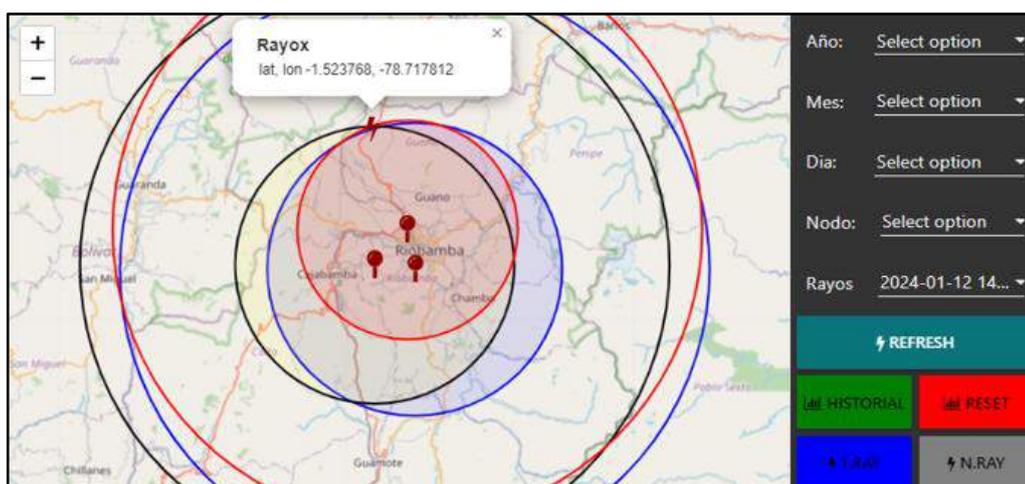


Ilustración 3-28: Ubicación de la caída del primer rayo (segundo evento)

Realizado por: Jeison O, 2024

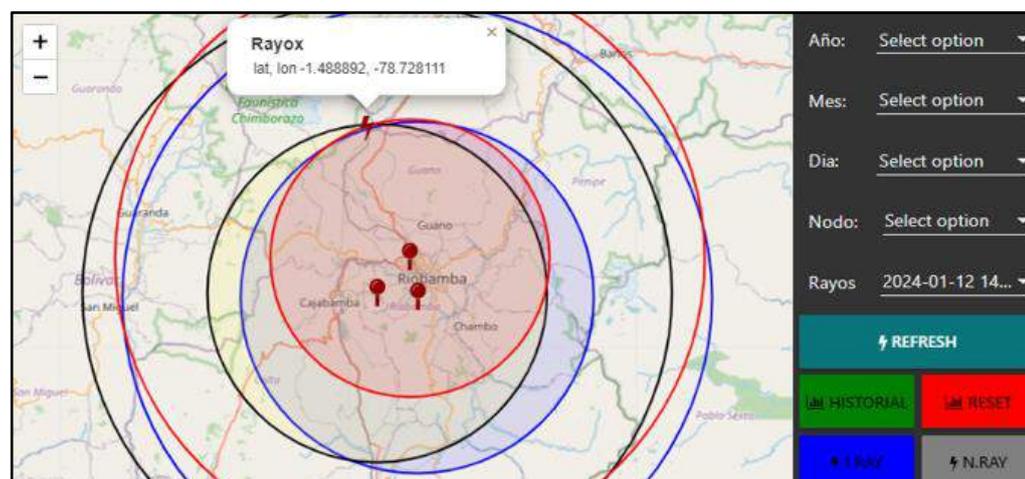


Ilustración 3-29: Ubicación de la caída del segundo rayo (segundo evento)

Realizado por: Jeison O, 2024

En el evento mencionado se evidencia la captura de datos relacionados con tres descargas atmosféricas ocurridas el 16 de enero de 2024. El primer rayo se registró a las 10:30:53h, el

segundo a las 11:36:24h y el tercero a las 13:02:29h. El prototipo de Cacha registró distancias de 13 km, 4 km y 4 km para los tres rayos respectivamente. Por otro lado, el prototipo San Francisco marcó distancias de 18 km, 8 km y 2 km, mientras que el prototipo Riobamba obtuvo distancias de 18 km, 8 km y 2 km para cada uno de los tres rayos. Estos detalles se presentan en la Ilustración 3-30.

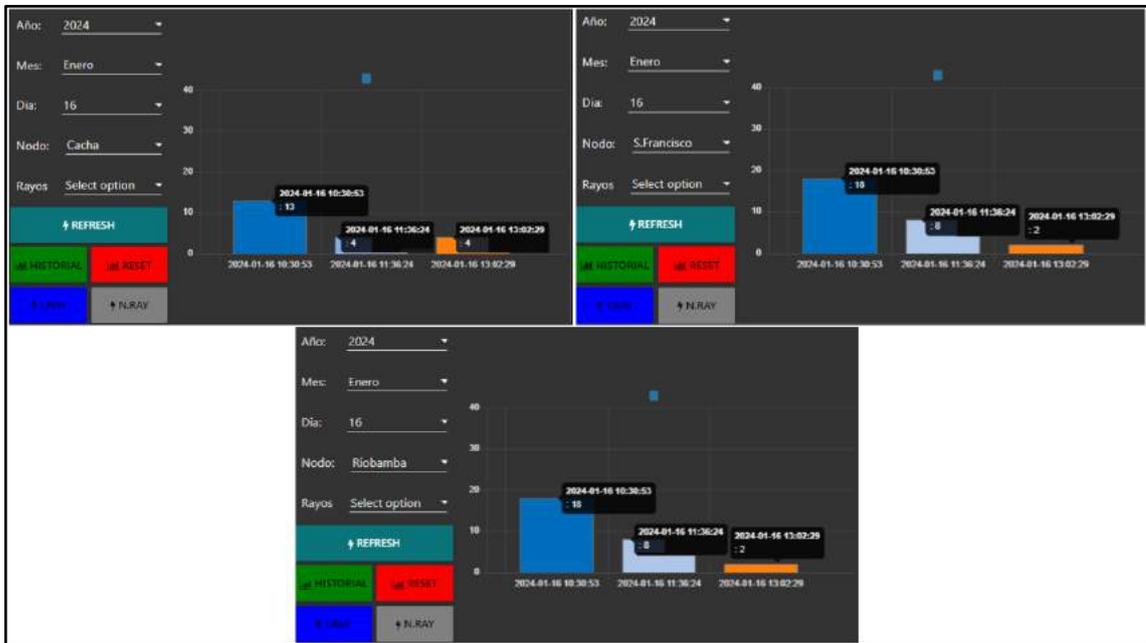


Ilustración 3-30: Distancias detectadas por los tres prototipos (tercer evento)

Realizado por: Jeison O, 2024

Ya obtenida las detecciones de cada uno de los prototipos, mediante el método de multiestación, se gráfica en el mapa la intersección entre los tres radios circulares. Luego, se calcula la coordenada el punto de la caída del rayo detectado tanto del primer rayo, el segundo y el tercero, situados en la ciudad de Riobamba y sus mediaciones, obteniendo la localización del primer rayo con una latitud de -1.744518 y longitud de -78.823212, del segundo rayo localizado con una latitud de -1.719827 y longitud de -78.733009 y del tercer rayo localizado con una latitud de -1.691908 y longitud de -78.681335. Para finalmente ser visualizado en el mapa del dashboard como se muestra en la Ilustración 3-31.

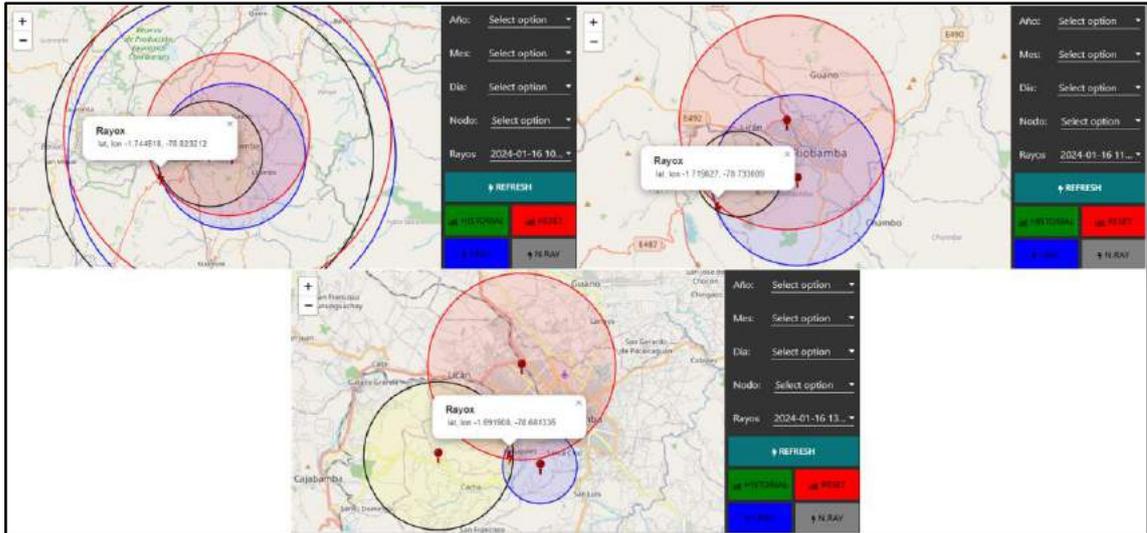


Ilustración 3-31: Ubicaciones de la caída de tres rayos (tercer evento evento)

Realizado por: Jeison O, 2024

Finalmente, se considera a estas distancias aceptables y eficientes; debido a que los parámetros de detección del sensor AS3935 especificados en la Sección 2.7.2, estiman un error de 1 km de distancia por sus 14 pasos de muestreo de datos este error se considera aceptable ya que los prototipos arrojan valores de distancia enteros (int), pero no decimales, es decir, se reduce la exactitud de detección con un error de 1km.

Durante el transcurso de realización de pruebas de funcionamiento del prototipo, se van almacenando todas las descargas atmosféricas (rayos) capturados por los prototipos en el servidor Node-Red, por lo cual se ha realizado un histórico de todas las localizaciones de rayos por mes, pudiendo ser visualizado en el mapa sus ubicaciones como se muestra en la Ilustración 3-32. Cabe mencionar que es un dato muy importante para futuros estudios que pronóstique los puntos de caída de los rayos.

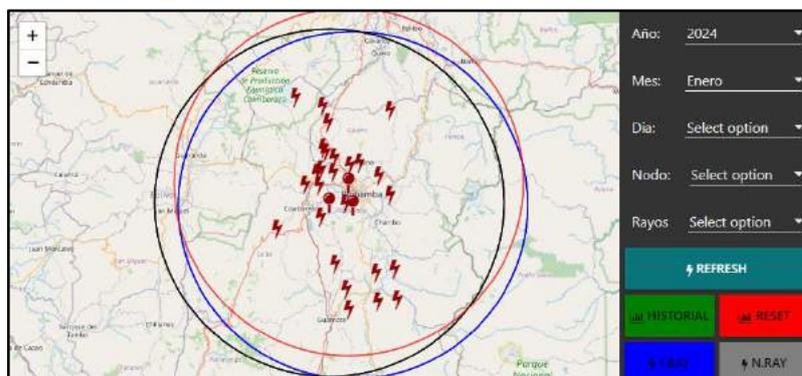


Ilustración 3-32: Historial de todas las descargas atmosféricas

Realizado por: Jeison O, 2024

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se exponen los resultados obtenidos por el prototipo de localización de descargas atmosféricas. En la Sección 4.1 se examina la extensión geográfica abarcada por los prototipos en distintas ubicaciones de la ciudad de Riobamba. La Sección 4.2 detalla los datos sobre la distancia entre los prototipos y el lugar de impacto de los rayos, proporcionando información sobre fechas, horas y ubicaciones de estos eventos. Por último, la Sección 4.3 presenta de forma visual los puntos de coordenadas geográficas donde ocurrieron los impactos de rayos en la zona de estudio.

4.1 Extensión de Cobertura

El área de cobertura donde se localizará las descargas atmosféricas abarca de toda la ciudad de Riobamba y gran parte de sus mediaciones.

4.1.1 *Prototipos Cacha – San Francisco – Riobamba*

Indudablemente, la selección estratégica de las ubicaciones de los tres prototipos, situados en el cerro Cacha, el cerro San Francisco y una residencia al norte de la ciudad de Riobamba, como se visualiza en la Ilustración 3-6, ha sido fundamental para la cobertura eficiente del área de estudio. Esta disposición geográfica estratégica ha permitido lograr una extensión de cobertura total de aproximadamente 4126 km^2 , como se describe en detalle en la Sección 3.4.1.

El análisis de la distribución de estos prototipos ofrece una perspectiva integral de la variación en la cobertura, destacando la capacidad de detectar y localizar descargas atmosféricas en distintas zonas de la región. La elección de ubicaciones estratégicas, como los cerros Cacha y San Francisco, añade un valor significativo al sistema de localización al abarcar áreas geográficas elevadas que potencialmente pueden ser más propensas a eventos atmosféricos.

Además, la inclusión de un prototipo en una residencia al norte de la ciudad de Riobamba demuestra la versatilidad del sistema al adaptarse a entornos urbanos, contribuyendo así a la ampliación de la capacidad de detección en áreas pobladas. Este enfoque integral no solo

maximiza la cobertura geográfica, sino que también permite una mejor comprensión de la variabilidad de eventos atmosféricos en diferentes contextos topográficos y ambientales.

4.2 Localización de Descargas Atmosféricas (rayos)

En relación con el monitoreo de descargas atmosféricas, se llevó a cabo una implementación progresiva de dispositivos. Inicialmente, el prototipo en el cerro Cacha (nodo 1) se instaló estratégicamente en la base de una antena de radio como se muestra en la Ilustración 4-1, estableciendo así un punto de observación clave. Esta elección puede atribuirse a la elevación del cerro Cacha, proporcionando un acceso óptimo para captar eventos atmosféricos.



Ilustración 4-1: Prototipo instalado en el cerro Cacha

Realizado por: Jeison O, 2024

Posteriormente, se amplió la red de monitoreo con la colocación de un segundo dispositivo en el cerro San Francisco (nodo 2) como se muestra en la Ilustración 4-2, esta vez en una torre de antenas de radio. Esta ubicación diversificada puede indicar una consideración meticulosa de las condiciones geográficas y atmosféricas, optimizando la capacidad de detección en diferentes entornos.

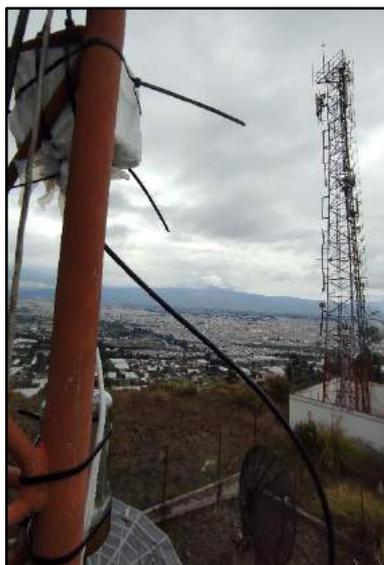


Ilustración 4-2: Prototipo instalado en el cerro San Francisco

Realizado por: Jeison O, 2024

El nodo principal, ubicado en Riobamba, se instaló en una casa domiciliaria como se muestra en Ilustración 4-3, lo cual podría sugerir una integración más cercana a entornos habitados, de tal como el dispositivo está conectado a la red WiFi, para así enviar la información de los tres nodos hacia el servidor.



Ilustración 4-3: Prototipo Instalado en el domicilio de Riobamba

Realizado por: Jeison O, 2024

La información adquirida desde el servidor Node-Red se presenta en la Ilustración 4-4, evidenciando el desempeño efectivo del sensor AS3935. Se logra registrar distancias de 10 km, 11 km, 12 km y 13 km en el prototipo Cacha, distancias de 10 km, 12 km, 14 km, 15 km en el prototipo de San Francisco y distancias de 4 km, 7 km, 9 km, 10 km, el día 07 de enero de 2024 en diferente horario. A lo largo de ese día, se observa que la detección de descargas atmosféricas aumenta con el tiempo, indicando una aproximación potencial de una tormenta eléctrica.

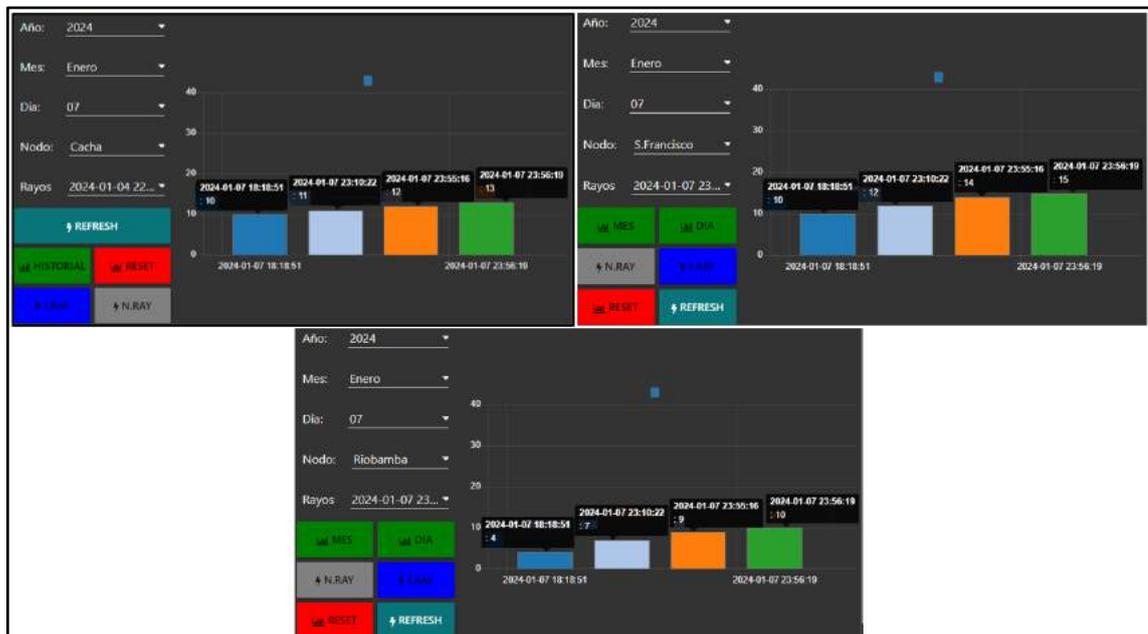


Ilustración 4-4: Información de detección adquiridas por los tres prototipos

Realizado por: Jeison O, 2024

Los tres prototipos de detección de descargas atmosféricas fueron instalados con el propósito de recopilar datos sobre distancias desde el 28 de diciembre de 2023.

4.3 Localización de descargas atmosféricas

En conclusión, se logró determinar la ubicación de los puntos de impacto de las descargas atmosféricas (rayos) el día 07 de enero del 2024, utilizando las distancias almacenadas en el servidor, según se presenta en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Distancia y hora de detección adquiridas por cada prototipo

PROTOTIPO CACHA			
Detección 1	Detección 2	Detección 3	Detección 4

Distancia	Hora	Distancia	Hora	Distancia	Hora	Distancia	Hora
10 km	18:18:51	11 km	23:10:22	12 km	23:55:16	13 km	23:56:19
PROTOTIPO SAN FRANCISCO							
Detección 1		Detección 2		Detección 3		Detección 4	
Distancia	Hora	Distancia	Hora	Distancia	Hora	Distancia	Hora
10 km	18:18:51	12 km	23:10:22	14 km	23:55:16	15 km	23:56:19
PROTOTIPO RIOBAMBA							
Detección 1		Detección 2		Detección 3		Detección 4	
Distancia	Hora	Distancia	Hora	Distancia	Hora	Distancia	Hora
4 km	18:18:51	7 km	23:10:22	9 km	23:55:16	10 km	23:56:19

Realizado por: Jeison O, 2024

4.3.1 Detección 1

En el proceso de detección, se registraron distancias de 10 km, 10 km y 4 km simultáneamente desde los prototipos instalados en el cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba, todos a la misma hora, 18:18:51h. Esta información, una vez almacenada, se procesa en el servidor de Node-Red para obtener las coordenadas geográficas en latitud y longitud. La representación visual de la intersección de las tres circunferencias, como se muestra en la Ilustración 4-5, permite identificar la ubicación de la caída del rayo. Es evidente que la descarga atmosférica ocurrió dentro del área de estudio predeterminada, es decir, en la ciudad de Riobamba y sus alrededores, con el punto de impacto del rayo coincidiendo con la intersección de las tres circunferencias.

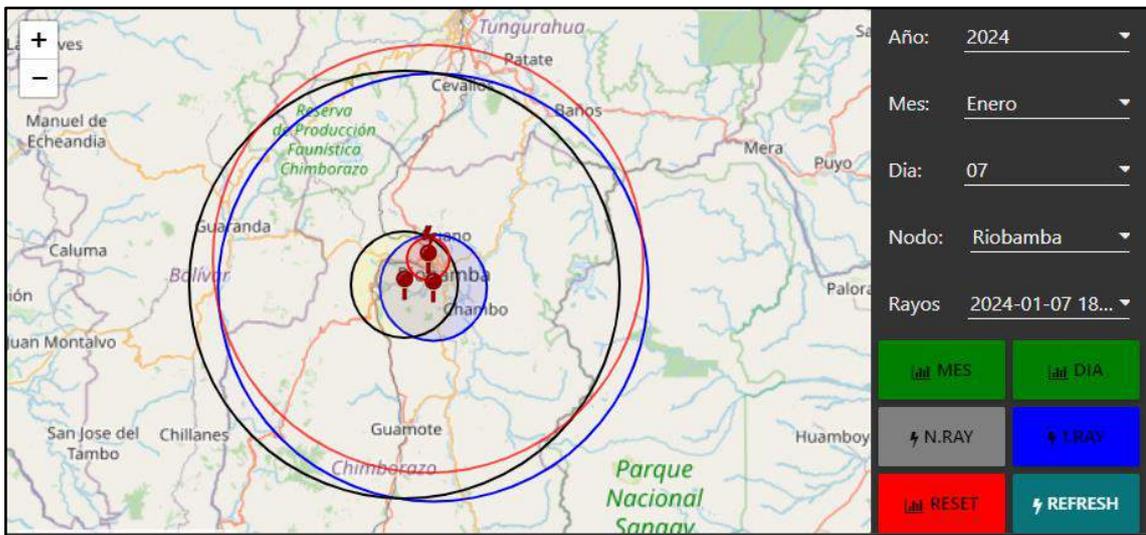


Ilustración 4-5: Ubicación del punto de impacto del rayo dentro de la zona designada (Detección

1)

Realizado por: Jeison O, 2024

La primera impresión que se presenta en la Ilustración 4-6 indica que el rayo impacta en el punto de intersección de los dos prototipos y uno cercano a la localización de descargas atmosféricas. No obstante, al examinar de manera más detenida, se nota que el punto de impacto del rayo corresponde al promedio de las tres intersecciones con un margen de error. Este fenómeno se debe a que los sensores proporcionan datos en valores enteros, lo que resulta en una aproximación basada en el promedio de los puntos de intersección más cercanos, logra obtener coordenadas geográficas en (latitud -1.612059 y el longitud -78.672668).

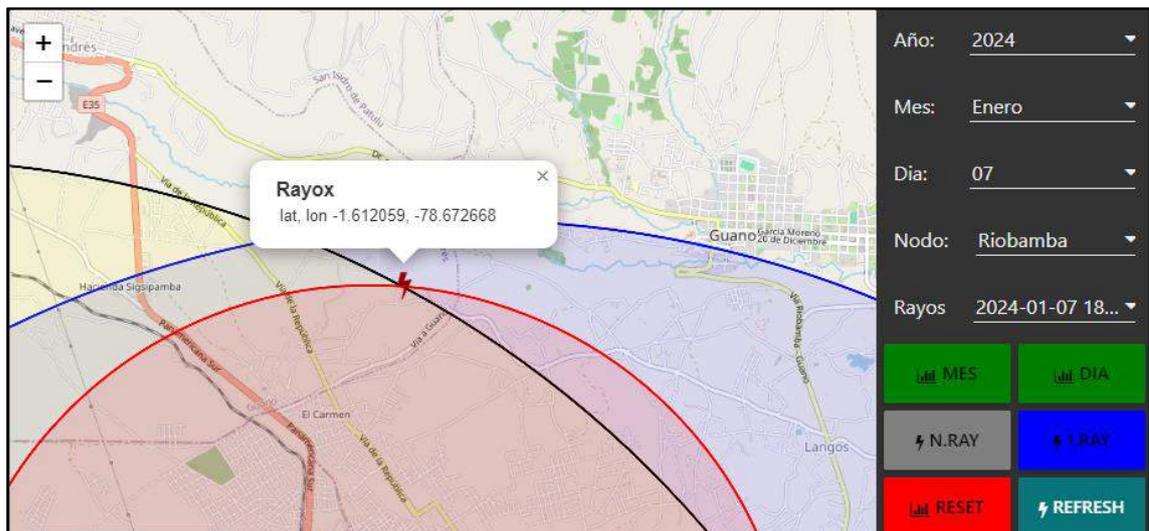


Ilustración 4-6: Ubicación precisa del punto de impacto del rayo (Detección 1)

Realizado por: Jeison O, 2024

4.3.2 Detección 2

En este incidente, se registraron distancias de 11 km, 12 km y 7 km desde los prototipos instalados en el cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba, respectivamente. Estos valores se transmiten al servidor Node-Red para su procesamiento, que incluye el cálculo de las coordenadas geográficas y la intersección de las circunferencias. Al llevar a cabo el procedimiento de multiestación, como se ilustra en la Ilustración 4-7, se confirma que el rayo impactó dentro del área de cobertura preestablecida. Posteriormente, al hacer un acercamiento al punto de intersección, se identifican los tres puntos principales de intersección, como se evidencia en la Ilustración 4-8. A través del cálculo del promedio de estas intersecciones, se obtienen las siguientes coordenadas geográficas (latitud: -1.595551 y longitud: -78.705284)

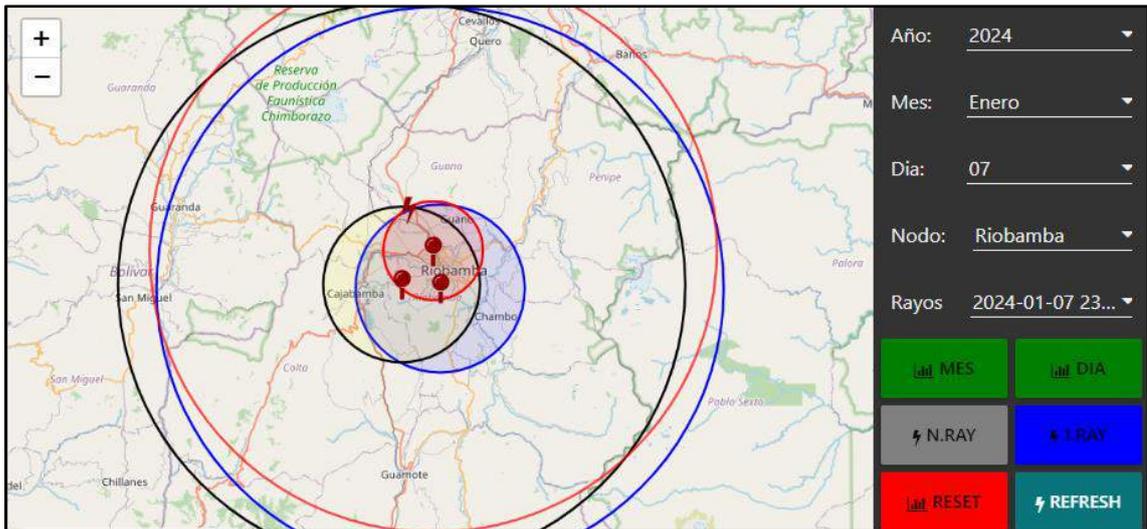


Ilustración 4-7: Ubicación del punto de impacto del rayo dentro de la zona designada (Detección 2)

Realizado por: Jeison O, 2024

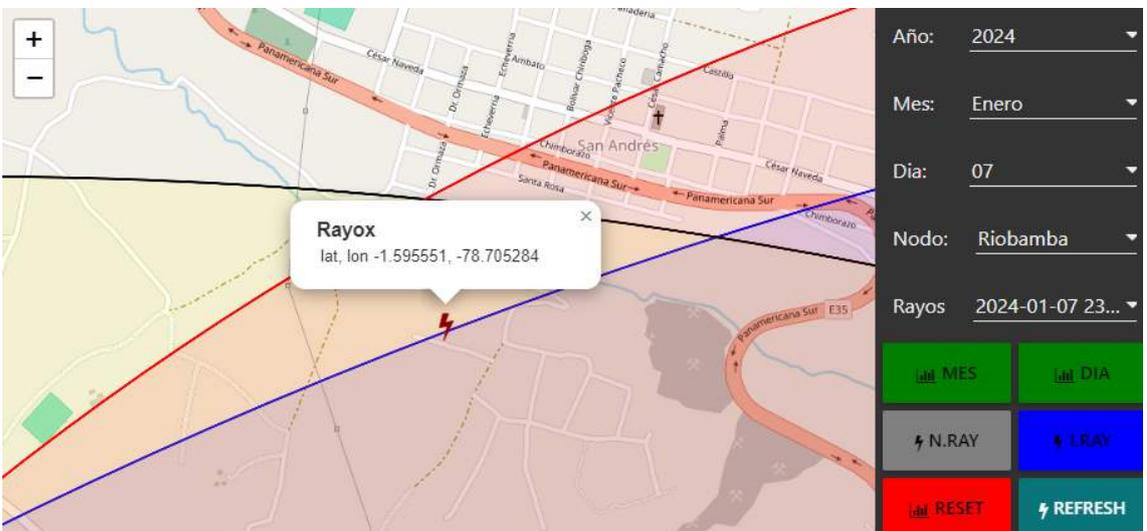


Ilustración 4-8: Ubicación precisa del punto de impacto del rayo (Detección 2)

Realizado por: Jeison O, 2024

4.3.3 Detección 3

En esta detección, se lleva a cabo el mismo proceso que en los eventos anteriores, con distancias de 12 km, 14 km y 9 km desde los prototipos ubicados en el cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba, respectivamente, a las 23:55:16h. Los resultados se presentan visualmente en las Ilustraciones 4-9 y 4-10. Como consecuencia de este proceso, se obtienen las coordenadas geográficas (latitud: -1.58447 y longitud: -78.724358).

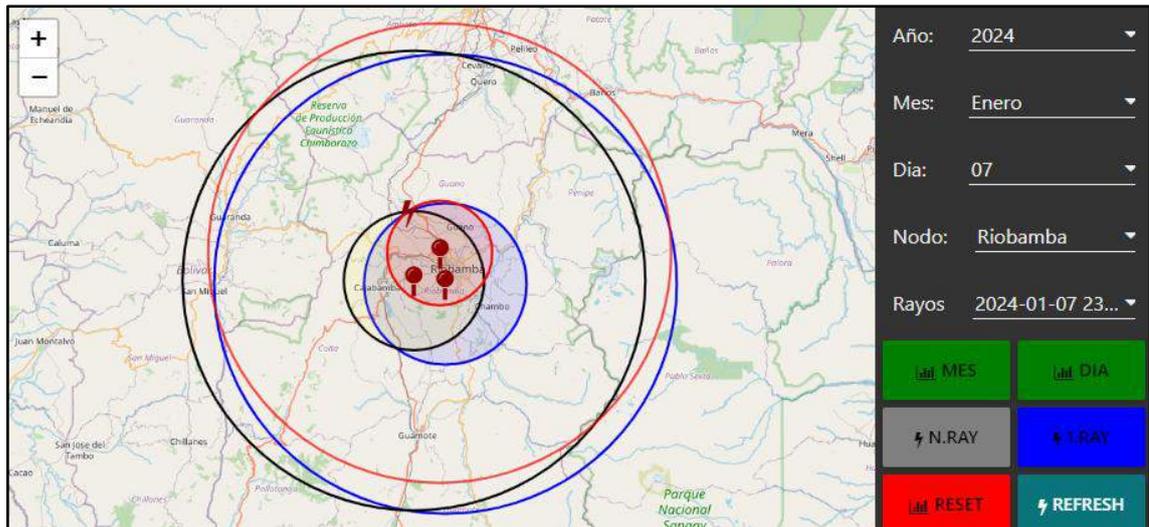


Ilustración 4-9: Ubicación del punto de impacto del rayo dentro de la zona designada (Detección 3)

Realizado por: Jeison O, 2024

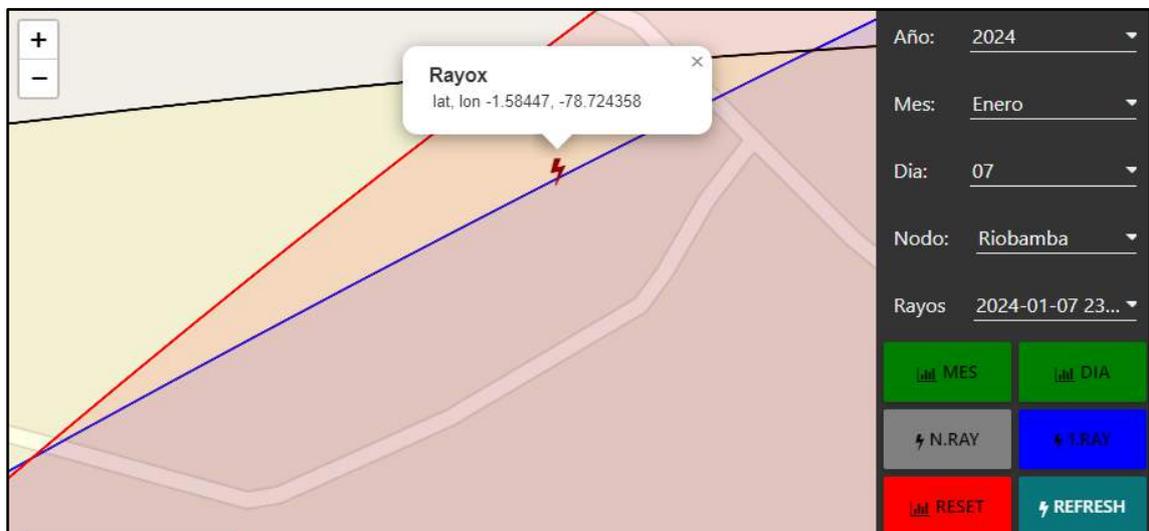


Ilustración 4-10: Ubicación precisa del punto de impacto del rayo (Detección 3)

Realizado por: Jeison O, 2024

4.3.4 Detección 4

En el marco de esta detección, se ejecuta el procedimiento de manera idéntica a los eventos previos, empleando distancias de 13 km, 15 km y 10 km desde los prototipos instalados en el cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba, respectivamente. Los resultados se presentan de forma gráfica en las Ilustraciones 4-11 y 4-12. Este proceso culmina con la obtención de las coordenadas geográficas (latitud: -1.576088 y longitud: -78.727707).

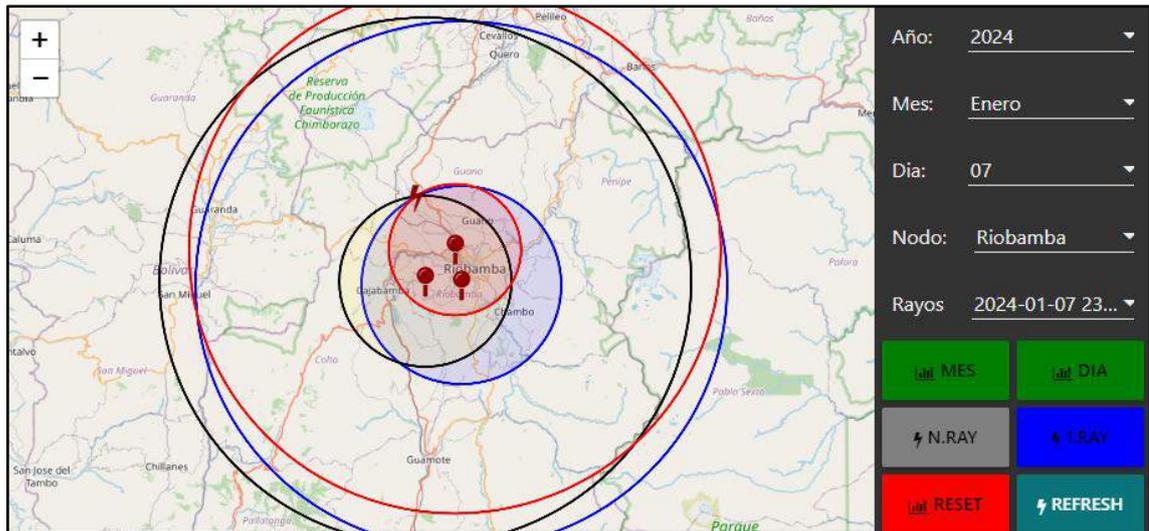


Ilustración 4-11: Ubicación del punto de impacto del rayo dentro de la zona designada (Detección 4)

Realizado por: Jeison O, 2024

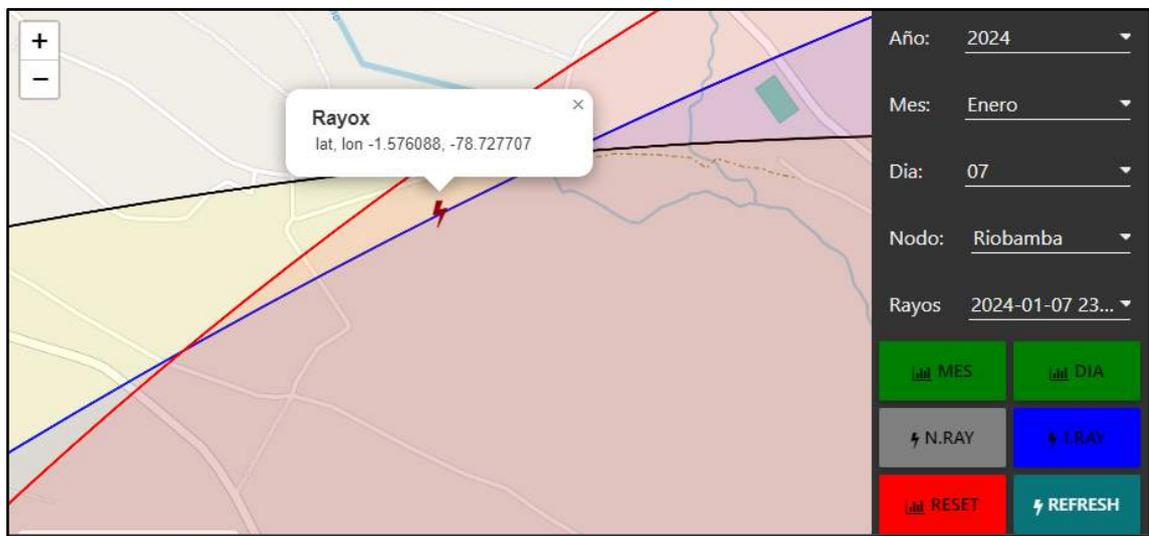


Ilustración 4-12: Ubicación precisa del punto de impacto del rayo (Detección 4)

Realizado por: Jeison O, 2024

Considerando los resultados analizados, se proporciona en la Tabla 4-2 las coordenadas geográficas derivadas de los prototipos de detección de descargas atmosféricas, junto con el tiempo promedio en el que se manifestaron dichos eventos.

Tabla 4-2: Ubicación de las cuatro detecciones ocurridas

DETECCIONES	HORA	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		Latitud	Longitud

Detección 1	18:18:51	-1.612059	-78.672668
Detección 2	23:10:22	-1.595551	-78.705284
Detección 3	23:55:16	-1.58447	-78.724358
Detección 4	23:56:19	-1.576088	-78.727707

Realizado por: Jeison O, 2024

Para concluir, la localización de los puntos de impacto de los rayos proporciona una estimación de una potencial tormenta eléctrica. En este caso específico, se observa una dirección consistente para cada evento, según se ilustra en la Ilustración 4-13, permitiendo identificar la trayectoria en la cual la tormenta eléctrica se desplaza.

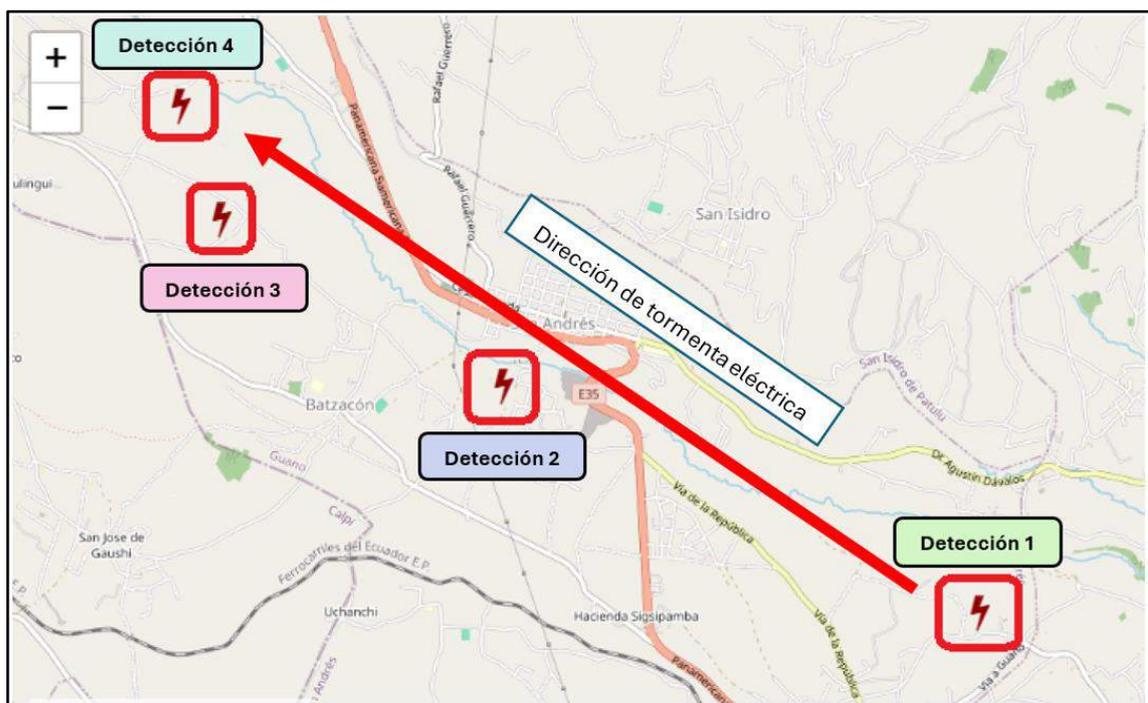


Ilustración 4-13: La dirección en la que se desplaza la tormenta eléctrica

Realizado por: Jeison O, 2024

4.4 Número de descargas atmosféricas por mes

En la siguiente Ilustración 4-14 se observa el registro de las descargas atmosféricas en el mes de enero de 2024 en diferentes ubicaciones del cantón Riobamba y sus mediaciones, permitiendo conocer la latitud y longitud de cada una.

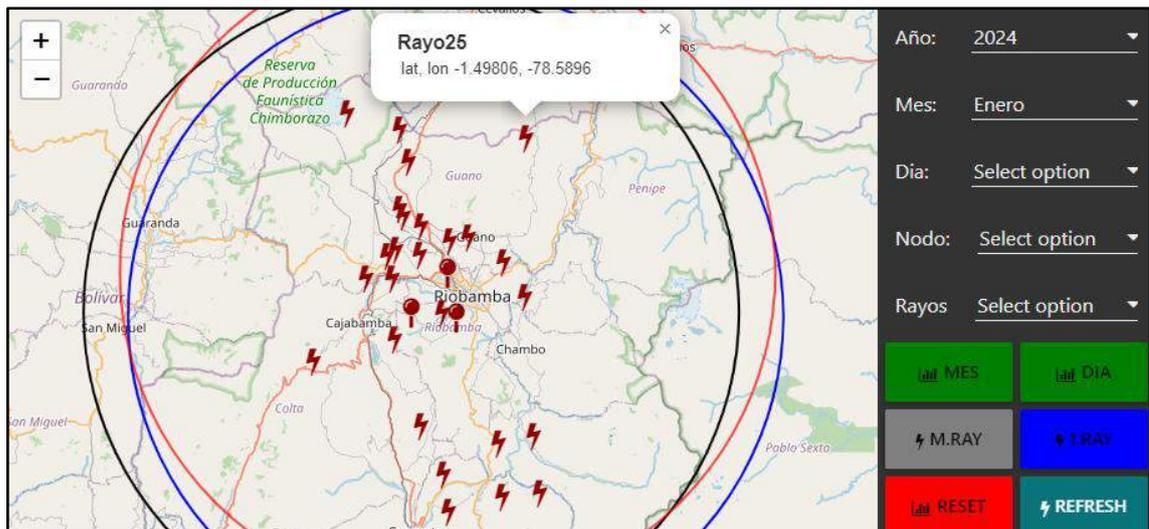


Ilustración 4-14: Grafico de descargas atmosféricas en enero 2024

Realizado por: Jeison O, 2024

Para mejor entendimiento de la Ilustración 4-14 se presenta el siguiente histograma en la Ilustración 4-15 que permite identificar el número de rayos registrados semanalmente, es así que en la primera semana del 1 al 7, existió una fuerte tormenta eléctrica, donde se detectaron 11 rayos, pero en las semanas siguientes disminuyeron, puesto que las condiciones climáticas son variables.

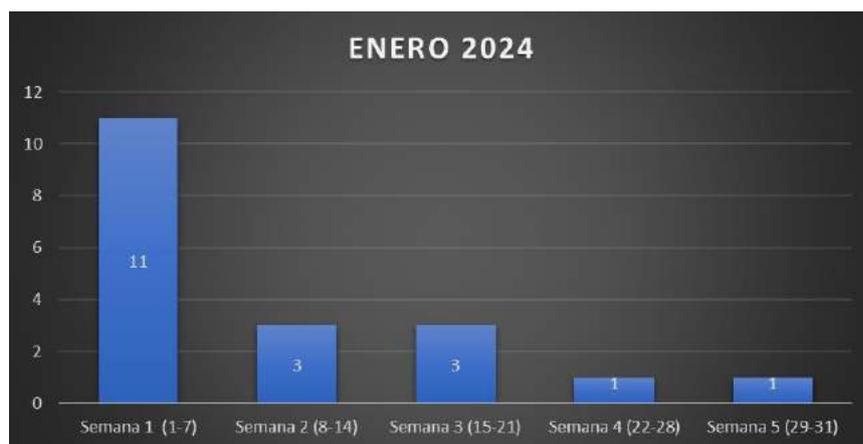


Ilustración 4-15: Histograma de rayos registrados en el mes de enero 2024

Realizado por: Jeison O, 2024

Así también, en la Ilustración 4-16 del mes de febrero del 2024 se visualiza las descargas atmosféricas en el cantón Riobamba y sus alrededores, con cada una de sus localizaciones.

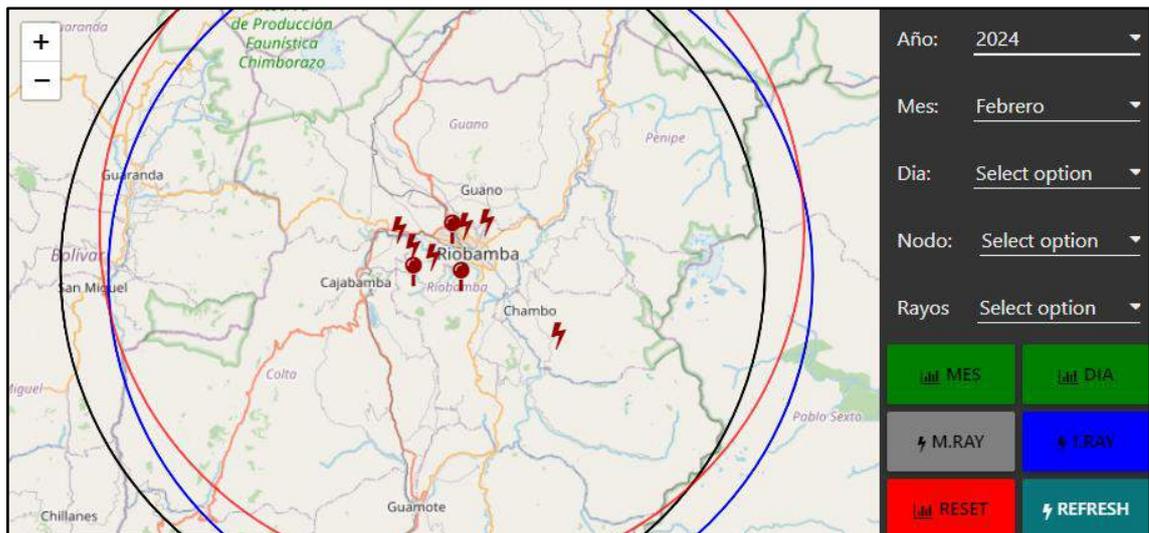


Ilustración 4-16: Grafico de descargas atmosféricas en febrero 2024

Realizado por: Jeison O, 2024

Para lo cual, se presenta el siguiente histograma de la Ilustración 4-17, donde se puede apreciar que, en la primera semana de este mes, hubo un incremento de descargas atmosféricas en relación con la última semana del mes de enero del presente año. Sin embargo, para la tercera semana no se registró ninguna actividad.



Ilustración 4-17: Histograma de rayos registrados en el mes de febrero 2024

Realizado por: Jeison O, 2024

4.5 Detección del rayo más cerca y más lejos al cantón Riobamba

Se pudo identificar la localización de caída del rayo más alejado y cercano al cantón Riobamba. El rayo más lejano cayó el 29 de enero de 2024 a las 15:47:01 horas, a distancias de 26 km, 29 km y 23 km, del cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba respectivamente, con coordenadas

geográficas de latitud -1.47104 y longitud -78.7852. Por otro lado, el más cercano fue con fecha 16 de enero a las 13:02:29 horas, a distancias de 4 km, 2 km y 5 km de cada una de sus ubicaciones mencionadas con anterioridad, con coordenadas geográficas de latitud -1.69191 y longitud -78.6813. Como muestra la siguiente ilustración 4-18:

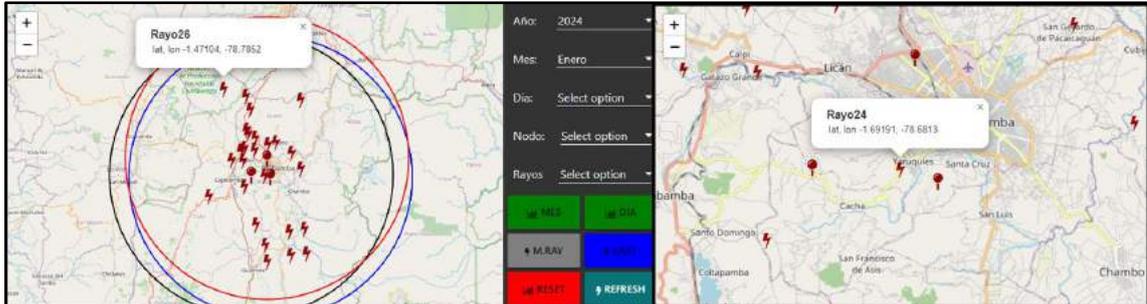


Ilustración 4-18: Rayo más cerca y más lejos al cantón Riobamba

Realizado por: Jeison O, 2024

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo se basa en el análisis de los resultados obtenidos respecto a los esperados. En la Sección 5.1 se presentan las conclusiones del Trabajo de Titulación. En la sección 5.2 se dan a conocer las recomendaciones para futuros proyectos.

5.1 CONCLUSIONES

- Se estudió el método de localización de descargas atmosféricas definiendo la técnica de multiestación, como ideal para el desarrollo del prototipo y obtener las ubicaciones de estos eventos.
- Tras evaluar el protocolo de comunicación LoRaWAN para la implementación del prototipo de localización de descargas atmosféricas, se concluye que es una opción fiable. Su capacidad para transmitir datos a larga distancia con bajo consumo de energía lo hace adecuado para aplicaciones de monitoreo en áreas remotas. Aunque presenta desafíos como la limitada capacidad de ancho de banda, su resistencia a interferencias y su eficiencia energética lo convierten en una opción viable para este proyecto.
- Se ha logrado diseñar un prototipo innovador para la localización de descargas atmosféricas utilizando el método de multiestación y tecnología LoRaWAN. A través de la interconexión entre estos módulos ubicados en el cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba, se ha demostrado la viabilidad de este enfoque para la detección de la caída del rayo en el cantón Riobamba y sus alrededores.
- Al implementar cada prototipo permitió identificar la localización de caída del rayo más lejos al cantón Riobamba, con fecha 29 de enero de 2024 a las 15:47:01 horas, a distancias de 26 km, 29 km y 23 km, del cerro Cacha, cerro San Francisco y Riobamba respectivamente, con coordenadas geográficas de latitud -1.47104 y longitud -78.7852. Mientras que el más cerca fue con fecha 16 de enero a las 13:02:29 horas, a distancias de 4 km, 2 km y 5 km de cada una de sus ubicaciones mencionadas con anterioridad, con coordenadas geográficas de latitud -1.69191 y longitud -78.6813. Dado que cada prototipo tiene una cobertura de 40 km de radio y al intersectarse entre sí, el área de cobertura aproximada fue de 4126 km^2 .
- Las pruebas realizadas se han validado en condiciones reales del prototipo para localización de descargas atmosféricas, proporcionando información valiosa para futuras mejoras, con el

fin de optimizar su desempeño y precisión, debido a que existe un margen de error de 1km en las especificaciones del sensor AS3935, pues trabaja con distancias en números enteros. En consecuencia, el prototipo se ha convertido en una herramienta esencial para prevenir posibles riesgos de las tormentas eléctricas en la región.

- De todas las detecciones de descargas atmosféricas suscitadas en el tiempo de prueba se consideró cuatro eventos relevantes; ya que, se registran la caída en línea recta. Contribuyendo al pronóstico de la dirección del siguiente rayo, mismos que fue registrados el día 07 de enero del presente año. El primero con coordenadas geográficas de latitud -1.612059 y longitud -78.672668, el segundo de latitud -1.595551 y longitud -78.705284, el tercero de latitud -1.58447 y longitud -78.724358 y el cuarto de latitud -1.576088 y longitud -78.727707.
- El sensor AS3935 fue elegido por su bajo costo, fácil implementación y bajo margen de error, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para empresas Eléctricas, de Telecomunicaciones, Aeropuertos, Industrias e incluso vidas humanas. Este sensor proporciona información oportuna que facilita la toma de decisiones antes de una descarga atmosférica, evitando daños en dispositivos eléctricos y sistemas electrónicos, reduciendo el impacto financiero en las empresas.

5.2 RECOMENDACIONES

- Los dispositivos LoRa requieren de un buen enlace donde exista línea de vista sin obstáculos y se encuentre dentro de un área de 15 km de distancia, evitando así problemas de enlace y mejorando la interconexión entre los prototipos.
- Utilizar el servidor Node-Red permite programar y configurar varios parámetros, facilitando la visualización y el manejo de los datos recolectados por cada prototipo, mismo que resulta de gran importancia para los resultados de este trabajo de titulación.
- Colocar los prototipos en sitios estratégicos es crucial para la utilización del método de multiestación, existiendo así una mejor y amplia cobertura de localización de descargas atmosféricas.
- Situar el sensor a una distancia no menor a 10 cm del dispositivo LoRa o de cualquier otro dispositivo que trabaje a frecuencias cercanas entre 500 kHz a 2MHz, evitando las interferencias que afectan la detección.
- Es necesario que tanto el dispositivo LoRa, como el sensor AS3935, estén protegidos para garantizar su correcto funcionamiento prolongando su vida útil, minimizando así costos de

mantenimiento y reemplazo, puesto que este dispositivo es sensible a las condiciones ambientales adversas.

BIBLIOGRAFÍA

AECERNNR, Paulo Peña Toro. *Control Recursos y Energia.. Control Recursos y Energia*, 2021. págs. 32-33.

AEMET. *La red europea EUCLID*. Agencia Estatal de la Meteorología. Europa, 2014, pág. 8.

AGUSTINO, Babaro Di. *Bavarodigital.net*. [En línea]. 2021. [Consulta: 20 octubre 2023] Disponible en: <https://bavarodigital.net/cual-es-la-diferencia-entre-rayo-trueno-y-relampago/>.

AMAZON. *Sensor Detection AS3935*. [En línea]. 2024. [Consulta: 02 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.amazon.com/CJMCU-3935-AS3935-Sensor-Detection-Distance/dp/B0C1YC39H4>.

AMS. *Sensor AS3935*. 2016. pág. 12.

ANRITSU, Revi. *Time Difference of Arrival (TDOA)*. Advancing Beyond. United States, 2022, pág. 3.

BALTUILLE, Pablo. *Instituto Nacional de Ciberseguridad*. [En línea] 2023. [Consulta: 23 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/lorawan-y-su-aportacion-las-tecnologiasiiot#:~:text=La%20arquitectura%20LoRaWAN%20est%C3%A1%20compuesta,de%20red%20o%20network%20server>.

BARROS, J.G. *Atlas climatológico del Ecuador*. 2010. pág. 6.

BASSI, Agustin. *Clases de Dispositivos LoraWan Protocolo de red LoRaWAN*. Buenos Aires Commons BY. 2021. pags 13-15.

BENINGO J. *Thunder Click*. [En línea] 2020. [Consulta: 19 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.digikey.com/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module>.

BERNAL, Daniel Garcia. *Particiones planas diagramas de Veronoi*, 2017, pág. 3.

BROWN, Arthur. *Pyme Alfa*. [En línea]. 2022. [Consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://alfaiot.com/iot/the-things-network-ttn/>.

BROWN, Venco. *LoraWan Cobertura LoRaWAN*. 2022, pág. 29.

BUSTON, George. *Cloudflare Protocolo UDP*. [En línea]. 2022. [Consulta: 12 enero 2023]. <https://www.cloudflare.com/es-es/learning/ddos/glossary/user-datagram-protocol-udp/>.

CANA, Veron. *Descargas Electricas*. Digitalbavaro, 2021, pág. 1.

CATSENSORS. *Tecnologia LoraWan Sensores e Instrumentacion Industrial*. [En línea]. 2023. [Consulta: 13 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>.

CHEN, xi. *CoAP Constrained Application Protocol / Overview*. [En línea]. 2017. [Consulta: 16 noviembre 2023]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/CoAP>.

CORRALES RUBIANO, Andrés López Herrera & CANDY YAZMÍN. *Identificadores Digitales Una Herramienta Que Apoya La Recuperación De Información*, 2013. pág 2.

DE CARVALHO, Flávio. *Sistema De Alerta De Ocorrência De Raios Utilizando Rede De Sensores De Campo Elétrico Atmosférico*. São José dos, 2016. págs 8-11.

ELECBEE. *Elecbec AS3935 I2 C SPI Lightning Sensor, Lightning Strike Storm distancias Detector Sensor Detección de Lightning*. [En línea]. 2023. [Consulta: 05 enero 2024]. Disponible en: <https://www.elecbec.com/es-25879-3935-AS3935-Flash-Sensor-Strike-Detection-Storm-Distance-Module>.

ELECTRONICS, Developer. *MDN Electro-Technology*. [En línea]. 2023. [Consulta: 15 octubre 2023]. <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTTP/Overview>.

ELECTROSTORE. *Modulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32*. [En línea]. 2023. [Consulta: 08 enero 2024]. <https://grupolectrostore.com/shop/modulos-y-shields/rf-radio-frecuencia/modulo-lora-ttgo-t-beam-915mhz-esp32-y-gps-y-antena/>.

FERNANDEZ, Pablo. *La red europea para la detección de rayos*. Europa, 2014. pág. 3.

FERRO, Delgado. *Arquitectura LoRaWAN para entornos.* Coruña, 2021. págs. 28-30.

FLORES, Santiago. 2021. *Control Recursos y Energia.* Quito, 2021. pág. 35.

FRIGMAN, Jhon. *Venco Electronica.* [En línea]. 2022. [Consulta: 11 enero 2024]. Disponible en: <https://www.vencoel.com/que-es-lora-como-funciona-y-caracteristicas-principales/#:~:text=Las%20frecuencias%20de%20funcionamiento%20var%20C3%ADan,868%20MHz%20y%20915%20MHz..>

GARCIA BERNAL, Daniel. *Ajuste de particiones planas mediante diagramas de Veronoi dsicretos.* 2017. págs. 8-11.

GARCÍA, Paul. *Ardiononet.* [En línea]. 2018. [Consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://descubrearduino.com/thingspeak/>.

GILBERTO, Tomas. *Actualización Del Mapa Isocerámico De Guatemala Y Su Influencia En El Diseño De Líneas De Transmisión.* 2004. págs. 18-30.

GRAEME, Anderson. *Red ATDnet Meteored,* 2013. págs. 03-04.

GRANIZO, Melisa. *Descargas Atmosfericas.* 2019, pág. 19.

GUAMAN, Dario. *Deteccion de descargas Atmosfericas.* 2023, pág. 9.

HEILMANN, Armando. *Detection Efficiency Analysis of Atmospheric Discharges Using AS3935 Sensor.* Curitiba. 2019, págs. 7-9.

HERNÁNDEZ, Silvia. *Estudio en detalle de LoraWan.* 2020. págs. 27-30.

INTRUMENTATION, Sensor E. *TECNOLOGÍA LORA Y LORAWAN Keller.* [En línea]. 2022. [Consulta: 11 enero 2024]. Disponible en: <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>.

JOHNSON, Kaller. *Arquitectura LoraWan TECNOLOGÍA LORA Y LORAWAN.* 2022. pág. 5.

JONES, Emma. *Ubidots STEM*. [En línea]. 2022. [Consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://es.ubidots.com/>.

KARAMI, Hamidreza. *On Practical Implementation of Electromagnetic Time Reversal to Locate Lightning*, 2014. pág. 139.

KELLER. *LoraWan, SigFox o Zigbee*. [En línea]. 2022. [Consulta: 11 enero 2024]. Disponible en: <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>.

KLUGMANN, Dirk & GRAEME, Anderson. *Datos de la red ATDnet*, 2014. págs. 12-15.

LAROJ, Gilberto Rafael. *Lineas de transmision*, 2004. pág. 9.

LERAD, Hector. *Lineas de transmision*, 2004. pág. 12.

LIGHTNING, Franklin. *AS3935*, 2020. pág. 2.

LLAMAS, Luis. *Ingenieria Informatica Protocolos de comunicaci3n*. [En línea]. 2019. [Consulta: 21 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/que-es-mqtt-su-importancia-como-protocolo-iot/>. bync057.

LOMBRAD, Camille. *Tecnologia LoraWan*, 2020. pág. 102.

L3PEZ CABALLERO, Jos3 Vilajosana. *Bandas del protocolo de comunicacion LoRaWAN*, 2020. págs. 27-30.

L3PEZ VICARIO, Jose. *Estudio de LoraWan*, 2020. pág. 81.

MARRIQUE, Miguel Angel & BUITRAGO, Leidy. *Redes LoRaWAN. Revisi3n de componentes*, 2022. pág. 26.

MAYSON, Robert. *Tormentas Electricas*. [En línea]. 2022. [Consulta: 07 noviembre 2023]. Disponible en: https://www.redcross.org/content/dam/redcross/atg/Chapters/Division_5/Atlanta/Atlanta_PDF_s/m4440080_Thunderstorm_SPN.pdf.

MILLER, Charly. *I+D ELECTRONICA*. [En línea]. 2023. [Consulta: 06 enero 2024]. Disponible en: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/gps/lilygo-ttgo-esp32-lora-1-1-detail>.

MONCHO T. *ThinkBig*. [En línea]. 2022. [Consulta: 12 octubre 2024]. <https://blogthinkbig.com/lorawan-ventajas-usos-telefonica#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20LoRaWAN%20y%20para,a%20trav%C3%A9s%20de%20grandes%20distancias..>

NAVARRO ORTIZ. *Arquitectura LoRaWAN*, 2021. págs. 72-46.

NAVARRO ORTIZ, Ferro. *Arquitectura LoRaWAN para entornos si*, 2021. págs. 56-71.

NETWORKS, Juniper. *Junos Address Aware*. [En línea]. 2022. [Consulta: 09 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.avg.com/es/signal/ipv4-vs-ipv6>.

NOWCAST, Lightning Detected. *Nowcast Lightning Detected*, 2023. pág. 1.

PASTORINO, Cecilia. *Bluetooth Low Energy Welve Security*, 2020. págs. 51-55.

PHILOS, Heidemann. *Underwater TDOA Acoustical Location Based on Majorization*, 2020. pág. 76.

PICKERING, Paul. *Ancho de Banda LoraWAN*. [En línea]. 2017. [Consulta: 03 de 12 de 2023]. Disponible en: <https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>.

PICKERING, Paul J. *Aplicación y Seguridad LoraWan*. [En línea]. 2017. [Consulta: 04 de 12 de 2023]. Disponible en: <https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>.

PICKERING, Paul. *Desarrollar con LoRa*, 2017, págs. 19-22.

POVEDA ZAFRA, Jose Noe. *Espectro ensanchado*, 2003. pág. 72.

PRATT, Georgia. *Tecnologías para la detección de rayos*, 2023. pág. 12.

PROTER, Fredy. *Lightning Detected*, 2022. pág. 7.

REVI, Anritsu. *Time Difference of Arrival (TDOA)*. 2022. págs. 3-5.

ROBÓTICA, Tecnología. *LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32: SanDoRobotics*. [En línea]. 2022. [Consulta: 21 enero 2024] Disponible en: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/gps/lilygo-ttgo-esp32-lora-1-1-detail>.

RODRÍGUEZ MUNCA, José Daniel. *Distancias de Interconexión Lora, Dispositivo Lora comunicación a Largo Alcance*. 2016, págs. 55-58.

ROMANO TÉLLEREZ, Luis. *Overview and Use of the PICmicro Serial Peripheral Interface, Microchip. SPI*. 2018, págs. 4-7.

ROMERO, Edison. *Arquitectura LoRaWAN*. Coruña, 2021. pág. 28.

RUBINSTER, Marcos. *On Practical Implementation of Electromagnetic. Time Reversal to Locate Lightning*. Arizona, 2017. pág. 192.

SANT, Jordi. *Node Red. PickData*. [En línea]. 2022. [Consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en: https://www.pickdata.net/es/noticias/node-red-programacion-visual-iot?gclid=Cj0KCQiA4NWrBhD-ARIsAFCKwWvxsjuc07E-J0NX1x_9Gjdw1PNwqfsGQk2-EyfQW57Vl5oGcsRn6CYaArsiEALw_wcB.08232.

SMITH, Charlie. *LINET data. Datos de detección de rayos*. Praga, 2020. págs. 11-12.

SONNADARA, Fernando & Edirisinghe, C.M. *Performance Comparison between the Magnetic Direction Finding Technique and the Time of Arrival Technique*. Colombia, 2001. págs. 3-5.

SULKHI. *Desarrollo del Sistema Detector de Rayos Utilizando el método de multiestación*. Indonesia, 2019. pág. 2.

SULKHI, Sastra K. *Development of Lightning Detector System Using*. Indonesia, 2019. pág. 21.

SULKHII. *Development of Lightning Detector System Using Multistation Method.* Mohammad, 2019. pág. 17.

SUPTOR, Frank. *Wifi (Wireless Fidelity) Newark.* [En línea]. 2023. [Consulta: 18 enero 2024] Disponible en: <https://mexico.newark.com/wireless-wifi-technology>.

SWISS., R. *Descargas Atmosfericas, Parámetros regionales de LoRaWAN.* Brasil, 2019. págs. 18-19.

TAYLOR, Emma. *Becolve Digital. Bandas LoRaWAN.* [En línea]. 2020. [Consulta: 03 de 01 de 2024]. Disponible en: <https://becolve.com/blog/parametros-regionales-de-lorawan/>.

TECHNOLOGY, Microchip. *Technical Brief. Getting Started with Serial Peripheral Interface (SPI).* Chandler, 2021. págs. 15-21.

THUNDER, Click Mikroe. *Sensor Thunder Click Detector de Descargas atmosfericas o sensor AS3935.* [En línea]. 2022. [Consulta: 19 de 11 de 2023]. Disponible en: <https://www.tme.com/mx/es/details/mikroe-1444/placas-de-expansion/mikroe/thunder-click/>.

TOMAS, Gilberto Rafael. *Lineas de transmision.* Guatemala, 2004. págs. 11-12.

TORRES NOVA, Juan Mario & Paz Penagos, HERNÁN. *Modulación GMSK. Estudio y comparación en eficiencia espectral y probabilidad de error de los esquemas de modulación.* Bogotá, 2008. págs. 76-80.

VAISALA. *Red GLD360. Red Global de deteccion de rayos.* Madrid, 2015. págs. 12-17.

VARGAS, Diego H. *Hostinger Protocols. Protocolo TLS (Transport Layer Security).* [En línea]. 2023. [Consulta: 22 diciembre 2023]. Disponible en: https://www.hostinger.es/tutoriales/protocolo-tcp?ppc_campaign=google_search_generic_hosting_all&bidkw=defaultkeyword&lo=9069555&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA98WrBhAYEiwA2WvhOtszhpCEAV_tFgaXn7aKpnXANzUELHSNBzKyRTCjHAfsof7LhV-M0hoCTCsQAvD_BwE.

VARGAS, Diego. *Hostinger Protocol. Protocolo TCP (Transmission Control Protocol)*. [En línea]. 2022. [Consulta: 22 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.hostinger.es/tutoriales/que-es-tls>.

VENCO. *En qué consiste LoRa Mosulation.*. Barcelona, 2020. pág. 7.

VERDUGO. *Rangos de detección Eléctrica*. Salesiana, 2017. págs. 27-67.

VERDUGO, Karla. *CONTRIBUCIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE DETECCIÓN DE RAYOS EN ECUADOR*. Leiria, 2017. págs. 16-18.

VIDMAR, Milán. *Métodos de detección de rayos*. [En línea]. 2001. [Consulta: 26 enero 2024]. Disponible en: <https://www.scalar.si/en/system/lightning-detection-methods/>.

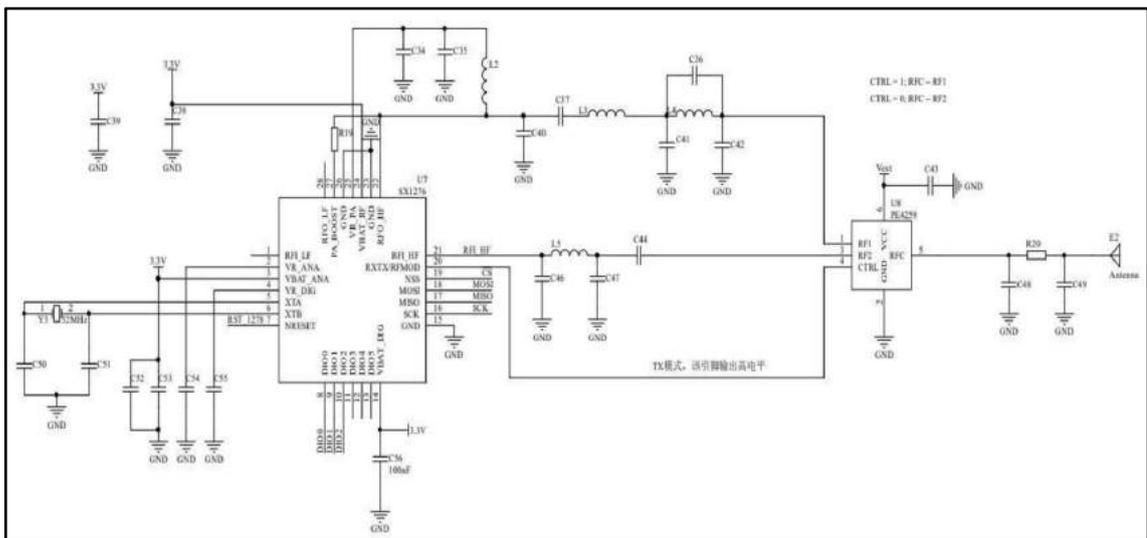
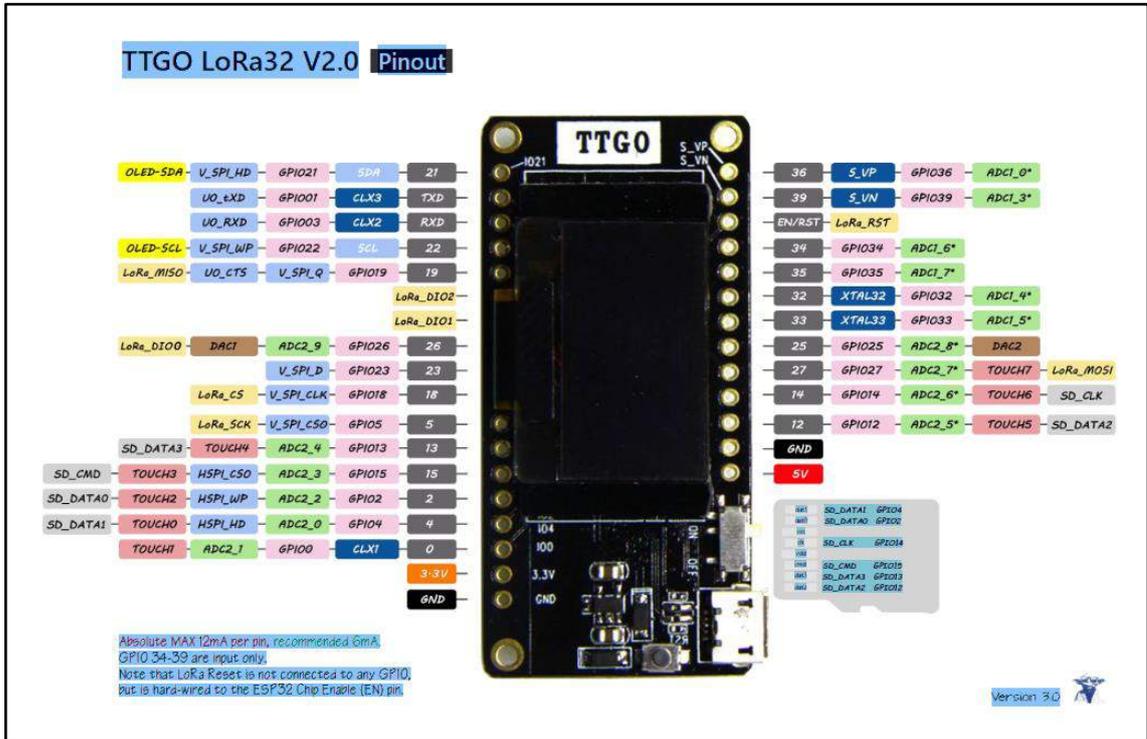
VLADISLAV, Pavel. *Rayos desde la red ATDNET*. Reino Unido, 2015. pág. 21.

WIJAYA, Satra Kusuma. *Development of Lightning Detector System Using Multistation*. Indonesia, 2019. pág. 1.

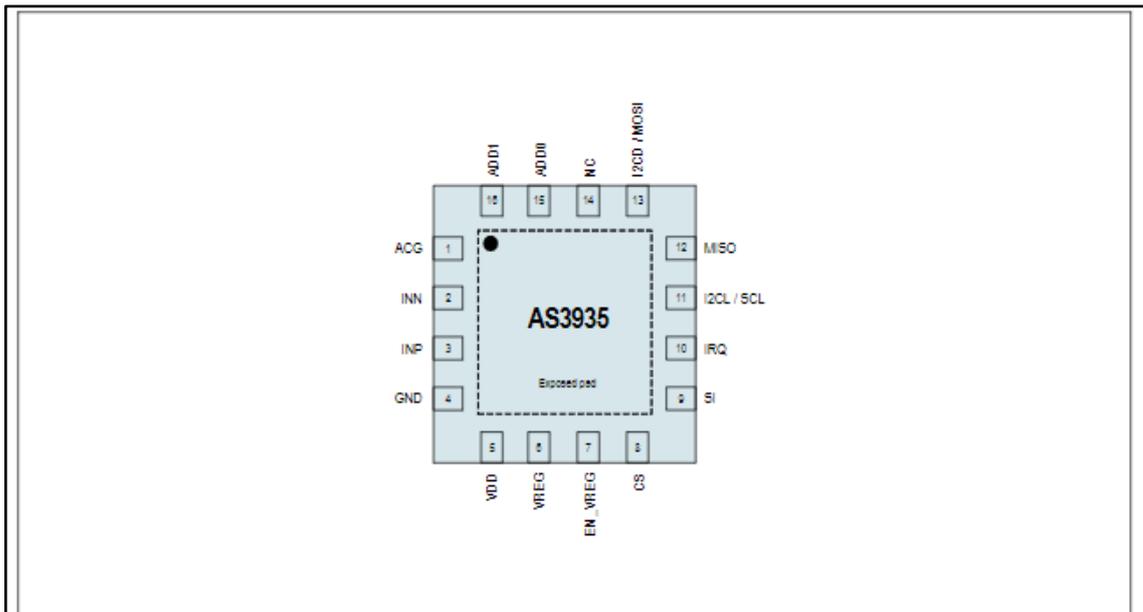
WILEY, John & Sons, FRANK. *Electromagnetic Time Reversal. The Wiley Network*. Wiley Home Page, 201. Vol. 55, pág. 26.

ANEXOS

ANEXO A: Hoja de datos del módulo LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32



ANEXO B: Hoja de datos del Sensor CJMCU A3935

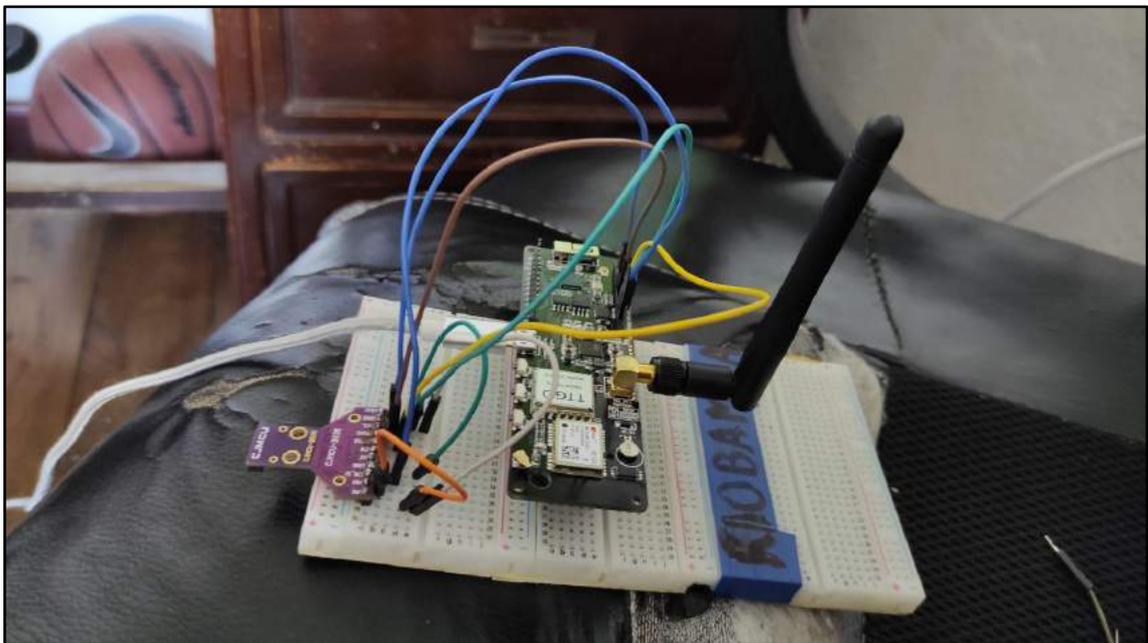


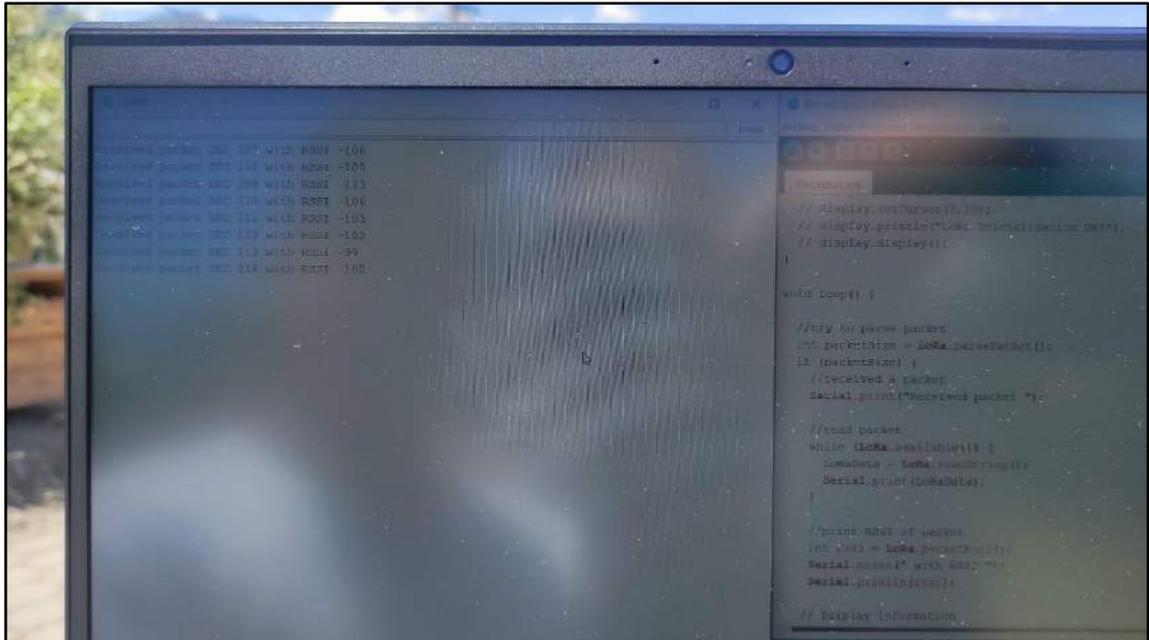
4.1 Pin Descriptions

Table 1. Pin Descriptions

Pin Number	Pin Name	Pin Type	Description
1	ACG	Analog I/O	AC-Ground
2	INN		Antenna ground
3	INP		Antenna positive input
4	GND	Supply pad	Ground
5	VDD		Positive supply voltage
6	VREG		Positive supply voltage / Regulated voltage
7	EN_VREG	Digital input	Voltage Regulator Enable
8	CS		Chip Select (active low)
9	SI		Select Interface (GND → SPI or VDD → I ² C)
10	IRQ	Digital output	Interrupt
11	I2CL/SCL	Digital input	I ² C clock bus or SPI clock bus (according to SI setting)
12	MISO	Digital output	SPI data output bus
13	I2CD/MOSI	Digital I/O with pull-up / Digital input	I ² C data bus or SPI data input bus (according to SI setting)
14	NC		Not connected
15	ADD0	Digital input	I ² C address selection LSB
16	ADD1		I ² C address selection MSB
Exposed pad		Supply pad	Connect to Ground via the GND plan and pin 4

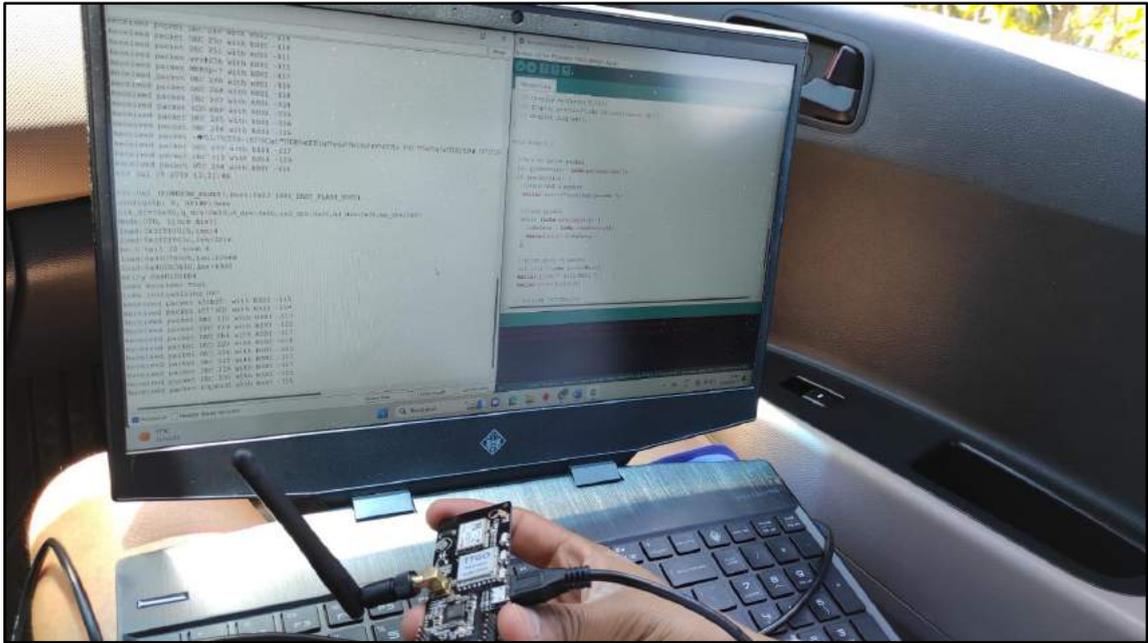
ANEXO C: Conexión y Configuración de dispositivos





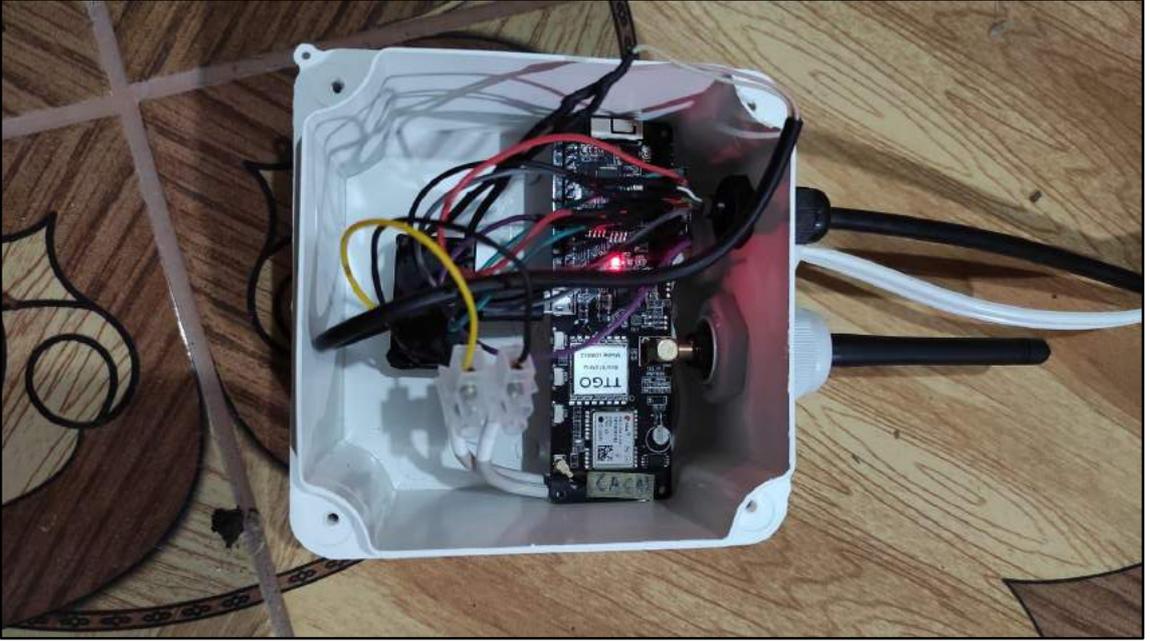
ANEXO D: Pruebas de alcance de los módulos LoRaWAN TTGO T-Beam ESP32





ANEXO E: Implementación de los Prototipos







ANEXO F: Colocación de los Prototipos en cada uno de los sectores





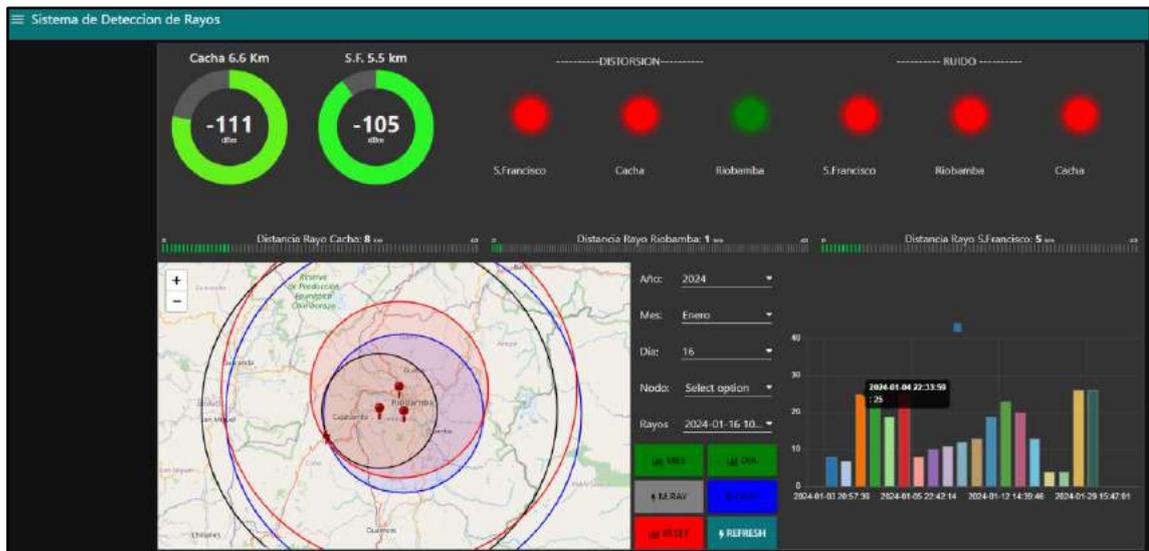


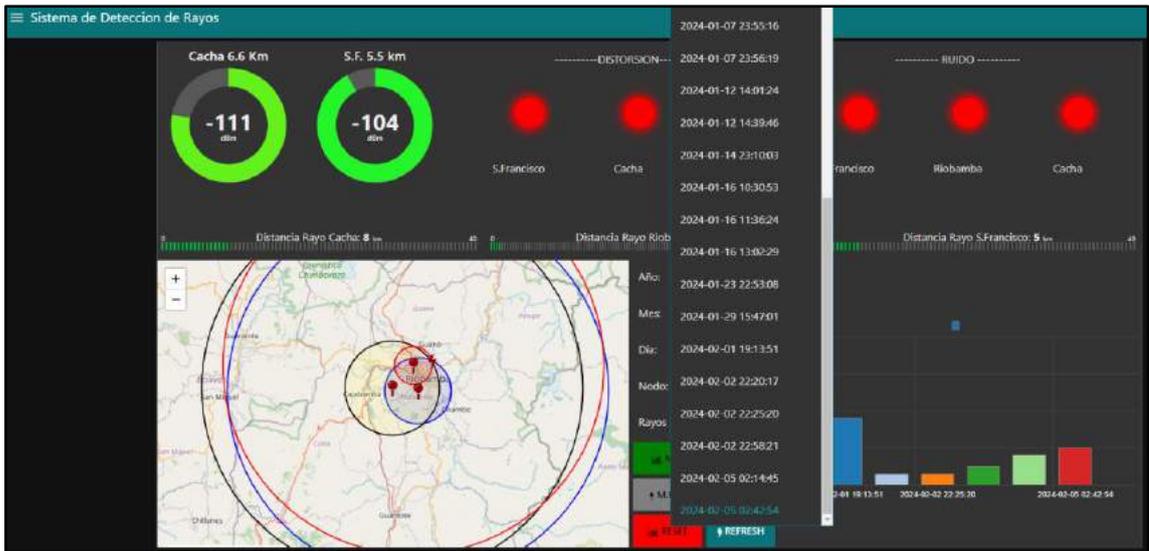






ANEXO G: Sistema de Detección de Rayos







ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 08/05/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Jeison Oldemar Ortiz Barrera
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Informática y Electrónica
Carrera: Telecomunicaciones
Título a optar: Ingeniero en Telecomunicaciones
 Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés Director del Trabajo de Titulación  Ing. Pedro Severo Infante Moreira Asesor del Trabajo de Titulación