

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN TECNOLOGÍA LORA PARA LA
DETECCIÓN DE INTERRUPCIONES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA
EN LA PROVINCIA DE LEONCIO PRADO**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

FRANCIS STARLYN VARGAS FLORES

Tingo María – Perú

2026



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

N° 002/2026- CPTGATP-FIME-UNAS

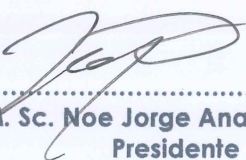
En la ciudad universitaria, al 01 día del mes de junio de 2026, siendo las 9:30 am, reunidos en el auditorio nuevo del Módulo de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, de la Escuela Profesional de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, se instaló el jurado evaluador nombrado mediante Resolución N° 083/2025-CF-FIME-UNAS, de fecha 30 de junio de 2025, a fin de dar inicio a la sustentación de la tesis para la obtención del **título de Ingeniero Mecánico Electricista** denominada: **"SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN TECNOLOGIA LORA PARA LA DETECCIÓN DE INTERRUPCIONES EN REDES DE DISTRIBUCION ELECTRICA EN LA PROVINCIA DE LEONCIO PRADO"**, presentado por el Bachiller en Ciencias de Ingeniería Mecánica Eléctrica **FRANCIS STARLYN VARGAS FLORES**.

Luego de la sustentación y absueltas las preguntas de rigor, se procedió a la respectiva calificación de conformidad con el **Art. 53° del Reglamento para el otorgamiento de Grados Académicos y Títulos Profesionales, modificado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (Resolución N° 113-2019-CU-RUNAS)**, cuyo resultado se indica a continuación:

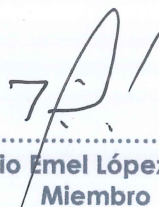
APROBADO POR : UNANIMIDAD
CALIFICATIVO : MUY BUENO

Siendo las 21:30 am, se dio por culminado el acto público de sustentación de tesis, firmando a continuación los miembros del honorable jurado y su asesor, en señal de conformidad.

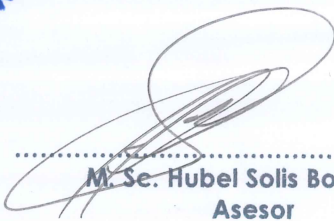
Tingo María, 01 de junio de 2026


.....
M. Sc. Noe Jorge Anahua Perez
Presidente




.....
Dr. Antonio Emel López Villanueva
Miembro


.....
M. Sc. JUAN CARLOS ZAPATA SIGÜENAS
Miembro


.....
M. Sc. Hubel Solis Bonifacio
Asesor

Nota:

(Excelente	= 19-20)
(Muy Bueno	= 16, 17, y 18)
(Bueno	= 13, 14, y 15)
(Regular	= 11, 12,)
(Malo	= 0, a 10)



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓNINSTITUTO DE
INVESTIGACIÓNUNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL*"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"**"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"***CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 194 - 2026 - CS-RIDUNAS**

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Mecánica Eléctrica

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN TECNOLOGÍA LORA PARA LA DETECCIÓN DE INTERRUPCIONES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN LA PROVINCIA DE LEONCIO PRADO	FRANCIS STARLYN VARGAS FLORES	06 % Seis	Menor a 20 %

Tingo María, 23 de junio de 2026.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

DEDICATORIA

A mis padres, Francis Vargas Ramirez y Marglinda Teodora Flores Villar, gracias a su infinito amor y apoyo incondicional durante toda mi formación profesional, los llevo siempre en mi mente y corazón.

AGRADECIMIENTOS

.

A Dios, por su bendición y protección, ya que gracias a él todo es posible.

A mi familia y amigos que cruzaron caminos conmigo compartiendo su tiempo y su compañía.

A todos mis docentes, quienes aportaron mucho durante mi desarrollo profesional compartiendo su conocimiento y experiencia.

INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo General.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Hipótesis	2
1.2.1. Hipótesis General	2
1.2.2. Hipótesis Específicas	2
II. REVISIÓN LITERARIA.....	4
2.1. Antecedentes	4
2.1.1. Antecedentes Nacionales	4
2.1.2. Antecedentes Internacionales	5
2.2. Marco Teórico	7
2.2.1. Sistema de monitoreo basado en tecnología LoRa.....	7
2.2.2. Detección de interrupciones.	19
2.3. Marco Conceptual.....	22
2.3.1. Redes Eléctricas Inteligentes	22
2.3.2. Sistemas de monitoreo eléctrico	23
2.3.3. Interrupciones en Sistemas Eléctricos de Distribución.	27
III. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. Lugar De Ejecución	31
3.2. Materiales y Métodos	31
3.2.1. Tipo De Investigación	31
3.2.2. Nivel de investigación	31
3.2.3. Enfoque De Investigación	32
3.2.4. Diseño De Investigación.....	32
3.2.5. Población	32
3.2.6. Muestra	32
3.2.7. Variables De La Investigación	33
3.2.8. Operacionalización De Las Variables	34
3.2.9. Técnicas e Instrumentos De Recolección De Datos.....	34
3.2.10. Métodos De Análisis De Datos	35

3.2.11.	Procedimiento.....	35
3.2.12.	Aspectos Éticos	36
3.2.13.	Descripción de componentes.....	36
3.2.14.	Descripción de la metodología de medición	40
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1.	Conceptualización del dispositivo	41
4.2.	Implementación de componentes.....	41
4.3.	Configuración del receptor	44
4.4.	Configuración del transmisor	46
4.5.	Lógica de Programación del equipo transmisor	49
4.5.1.	Configuración Inicial del Sistema	49
4.5.2.	Recolección y procesamiento de datos del equipo transmisor	50
4.5.3.	Lógica de decisión y transmisión de alertas	50
4.6.	Lógica de programación del equipo receptor y almacenamiento de datos	51
4.6.1.	Inclusión de librerías y definición de periféricos	51
4.6.2.	Inicialización y sincronización del sistema	52
4.6.3.	Recepción y decodificación de datos	53
4.6.4.	Almacenamiento en memoria no volátil.....	54
4.6.5.	Gestión de fallos y pérdida de señal	55
4.7.	Validación del funcionamiento del dispositivo.	56
4.7.1.	Pruebas del dispositivo	57
4.7.2.	Análisis del Comportamiento de la Señal LoRa (RSSI) frente a la Distancia	58
4.7.3.	Fiabilidad de Transmisión y Tasa de Pérdida de Paquetes.....	61
4.7.4.	Precisión en la Detección de Interrupciones Eléctricas.....	63
4.8.	Discusiones	64
4.8.1.	Rendimiento y alcance del enlace LoRa frente a las condiciones del entorno	64
4.8.2.	Precisión en la detección y eliminación de falsos positivos.....	65
4.8.3.	Impacto en la gestión de la calidad del suministro (SAIDI / SAIFI)	65
V.	CONCLUSIONES.....	67
VI.	RECOMENDACIONES	68
VII.	REFERENCIAS.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Comparación entre las principales tecnologías de comunicación por radio frecuencia.	18
2. Relación calidad de la conexión.	22
3. Tipo de fallas eléctricas	28
4. Operacionalización de variables	34
5. Relación en entradas y salidas entre el LoRa y el Arduino Nano en el receptor...	44
6. Relación en entradas y salidas entre el display LCD y el Arduino Nano.....	45
7. Relación en entradas y salidas entre el módulo del Micro SD y el Arduino NANO ...	45
8. Relación en entradas y salidas entre el sensor ZMPT101B y el Arduino NANO.....	47
9. Relación en entradas y salidas entre el módulo del Micro SD y el Arduino NANO. ...	47
10. Relación en entradas y salidas entre el módulo RTC y el Arduino NANO	48
11. Escalas de Calidad de Señal LoRa.	58
12. Rendimiento del Sistema de Monitoreo LoRa	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Entradas y salidas del Arduino UNO.....	9
2. Pines del microcontrolador ATmega32P.....	11
3. Arquitectura de Red del LoRaWAN	13
4. LoRa y LoRaWAN.	14
5. Entorno de desarrollo de IDE Arduino Versión 1.6.8.	17
6. Esquema general de un sistema SCADA.....	24
7. Arduino NANO.....	37
8. Sensor de voltaje ZMPT101B.	38
9. Display Alfanumérico LCD LC1622.....	38
10. Modulo I2C PCF8574.	38
11. Módulo RTC DS1302 Diseño del circuito	39
12. Diagrama de flujo del funcionamiento.	40
13. Diagrama de conexión del dispositivo transmisor.....	42
14. Implementación de componentes del equipo transmisor.....	43
15. Diagrama de conexión del dispositivo receptor.	43
16. Implementación de componentes del equipo receptor.	44
17. Código del software embebido del equipo receptor.	46
18. Código del software embebido del equipo receptor.	48
19. Serial monitor mostrando datos del tomados por el equipo transmisor	56
20. Comparación de la medición de tensión del dispositivo	58
21. Medición de la señal del dispositivo hasta los 20 primeros metros.....	59
22. Comportamiento del nivel de señal RSSI durante los 20 primeros metros.	60
23. Comportamiento del nivel de señal RSSI hasta los 40 metros.	60
24. Comportamiento del nivel de señal RSSI hasta los 140 metros.	61
25. Equipo receptor con perdida se señal del equipo transmisor.....	62
26. Nivel de señal RSSI en función del tiempo hasta los 240 metros.	63
27. Diagrama de conexión del dispositivo de monitoreo.	73
28. Dispositivo de monitoreo tomando valores de tensión.....	74

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal desarrollar un sistema de monitoreo basado en tecnología LoRa para la detección de interrupciones en redes de distribución eléctrica en la provincia de Leoncio Prado. Debido a la vasta extensión de estas redes y el alto costo de implementación de sistemas tradicionales como SCADA, la detección tardía de fallas impacta negativamente los indicadores de calidad del suministro (SAIDI y SAIFI) de las empresas concesionarias. La metodología empleada fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño cuasiexperimental. Se diseñó e implementó un prototipo compuesto por un equipo transmisor con sensor de voltaje ZMPT101B y microcontrolador Arduino Nano y un equipo receptor Datalogger con módulo RTC y memoria MicroSD, ambos enlazados mediante transceptores LoRa SX1278 a 433 MHz. Los resultados de las pruebas de campo evidenciaron que el sistema opera con una fiabilidad del 100% cero pérdidas de paquetes en un radio de hasta 120 metros, atenuándose progresivamente la señal y alcanzando un 66.67% de pérdida a los 240 metros debido a la absorción de la onda por los obstáculos del entorno. Asimismo, el software embebido logró una precisión exacta al detectar interrupciones simuladas de forma inmediata y sin registrar falsos positivos durante la tensión nominal operativa. Se concluye que el sistema propuesto constituye una solución viable, de bajo costo y alta eficiencia técnica y permitiendo notificar fallas en tiempo real.

Palabras clave: Tecnología LoRa, Detección de interrupciones, Internet de las Cosas (IoT).

A Monitoring System Based on LoRa Technology for the Detection of Interruptions in Electrical Distribution Networks in the Leoncio Prado Province

Abstract

The principal objective of the present research was to develop a monitoring system based on LoRa technology in order to detect interruptions in electrical distribution networks in the Leoncio Prado province [of Peru]. Due to the vast extension of these networks and the high cost of the implementation of traditional systems such as SCADA, late detection negatively impacts the supply quality indicators (SAIDI and SAIFI; acronyms in Spanish) for the concessionaries. The method that was used was the applied type, with a quantitative focus and a quasi-experimental design. A prototype was designed and implemented [which was] made up of transmitter equipment with a ZMPT101B voltage sensor, a Arduino Nano micro controller and Datalogger receptor equipment with an RTC module and MicroSD memory card; both were linked using LoRa SX1278 transceivers at 433 MHz. The results of the field test evidenced that the system operated with a trustworthiness of 100% [with] zero loss of packets within a radius of up to 120 meters, with the signal fading progressively and achieving 66.67% loss at 240 meters due to the absorption of the waves from obstacles in the environment. At the same time, the embedded software achieved exact precision, since it detected simultaneous interruptions in an immediate manner and without registering false positives during the operative nominal tension. It was concluded that the proposed systems made up a viable, low-cost solution [with] high technical efficiency [that] allowed for the notification of failures in real time.

Keywords: LoRa technology, detection of interruptions, internet of things (IoT).

I. INTRODUCCIÓN

Debido a la gran extensión de las redes de distribución eléctrica a menudo estas no se encuentran correctamente monitoreadas ya que la implementación de tecnologías de monitoreo usualmente empleadas como el SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) tienen un costo alto de instalación. Por otro lado, la tecnología LoRa (Lore Range) ofrece capacidades de comunicación de larga distancia con bajo consumo energético y bajo costo de adquisición.

Las constantes interrupciones que sufren los sistemas eléctricos de manera intempestivas hacen que sea necesario la detección temprana de las mismas para la toma de acción en respuesta a la interrupción del servicio eléctrico, si estas interrupciones no se gestionan adecuadamente pueden afectar negativamente la eficiencia de la calidad de servicio de las empresas concesionarias de energía eléctrica, por lo que es necesario desarrollar métodos para la detección y localización de fallas para de esa manera evitar una interrupción prolongada del suministro eléctrico.

Se investiga el desarrollo de un sistema de monitoreo de tensión en voltios que utilice tecnología LoRa para la comunicación a larga distancia para mejorar la detección de las interrupciones en las redes de distribución eléctrica de Tingo María. Con el desarrollo de este sistema se pretende ofrecer una solución innovadora que pueda ser aplicada en diferentes zonas de la extensión de las redes de distribución eléctrica de Tingo María y de esta manera contribuir a la mejora de la calidad del servicio eléctrico.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

- Desarrollar un sistema de monitoreo basado en tecnología LoRa para la detección de interrupciones en redes de distribución eléctrica en la Provincia de Leoncio Prado.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar el hardware basado en tecnología LoRa adecuada para garantizar una detección rápida de interrupciones en redes de distribución eléctrica.
- Desarrollar software embebido para la detección de las interrupciones en redes de distribución eléctrica en la provincia de Leoncio Prado.
- Simular de un sistema de monitoreo implementando tecnología LoRa para la detección de interrupciones.

1.2. Hipótesis

1.2.1. Hipótesis General

- El desarrollo de un sistema de monitoreo basado en tecnología LoRa mejorara la detección de interrupciones en redes de distribución eléctrica en la Provincia de Leoncio Prado.

1.2.2. Hipótesis Específicas

- El diseño de hardware basado en tecnología LoRa garantizará una detección más rápida de interrupciones en redes de distribución eléctrica, mejorando la capacidad de respuesta ante fallas.
- El desarrollo de software embebido mejorará la detección de las interrupciones en redes de distribución eléctrica en la provincia de Leoncio Prado.

- La simulación de un sistema de monitoreo implementando tecnología LoRa permitirá identificar y optimizar los tiempos de respuesta y la precisión en la detección de interrupciones en redes de distribución eléctrica.

II. REVISIÓN LITERARIA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Nacionales

N.1. Según Chacon (2022) en su investigación: “Análisis y propuesta de mejora de la calidad de suministro de energía eléctrica de la empresa Electronorte S.A.”, en donde analiza y realiza una propuesta de mejora de la calidad del suministro de energía brindada por la empresa de distribución Electronorte S.A. , donde menciona que a nivel de interrupciones las fallas internas representan el 53.87% del tiempo de duración de interrupciones, indica que dentro de sus debilidades es la falta de priorización de inversiones para mejorar la gestión de redes eléctricas, dentro de las recomendaciones más destacadas es que la renovación de equipos y redes, automatización de equipos, priorización de gestión de las redes eléctricas y monitoreo del suministro eléctrico.

N.2. Como indica Papuico Limaymanta (2025) en su tesis “Gestión de la calidad de suministro eléctrico en instalaciones de distribución de media tensión de los departamentos de Moquegua y Tacna”, menciona que la prestación del servicio eléctrico en el país se encuentra regulado por el Organismo supervisor de la inversión en energía y minas (Osinerghmin), que mediante el “Procedimiento para la Supervisión de la Operación de los Sistema Eléctricos” aprobado con Resolución N°074-2004-OS/CD (Osinerghmin, n.d.) donde se establece las tolerancia para los indicadores SAIDI y SAIFI que mide la calidad de suministro eléctrico en media tensión, el incumplimiento por exceder las tolerancias de los indicadores SAIFI y SAIDI respecto a la calidad del suministro eléctrico se considera como infracción correspondiendo una sanción de acuerdo a lo dispuesto en el Anexo 13 “Escala de multas y Sanciones de la Gerencia de Fiscalización Eléctrica” aprobada con Resolución N°590-2007-OS/CD (Osinerghmin, n.d.), no obstante en la no detección de las causas de las

fallas restringe la aplicación de acciones correctivas a tiempo y esa carencia impide que se pueda mejorar eficientemente la calidad del suministro eléctrico. El autor destaca que la falta de un sistema automatizado y en tiempo real en los nodos de distribución agrava el tiempo de respuesta, elevando el indicador SAIDI y, por ende, las penalizaciones económicas a la concesionaria.

N.3. Cabrera Rojas & Laura Condori (2024) en su tesis “Diseño de un sistema de supervisión de alumbrado público, basado en los modelos de ciudad inteligente e internet de las cosas para la ciudad de Sicuani”, tiene como fin elaborar un sistema de supervisión basado en los modelos de ciudad inteligente e internet de las cosas, donde en tiempo real supervisaba las luminarias del alumbrado público determinando el consumo de energía, basándose en la potencia y por consecuencia en el voltaje y amperaje de la red, estos datos fueron enviados en un servidores centralizado que funciona sobre el internet de las cosas para su supervisión

2.1.2. Antecedentes Internacionales

I.1. Como concluye Mora et al. (2024) en su estudio “Análisis de técnicas avanzadas de monitoreo y telemetría para gestión energética en transformadores de baja tensión” que use la integración de tecnologías IoT y telemetría permite una mayor eficiencia energética, mejor mantenimiento predictivo, reducción de pérdidas técnicas y mayor confiabilidad del suministro eléctrico. Además, promueve una gestión más sostenible y precisa de los recursos energéticos, con potencial aplicación a gran escala en redes de distribución.

I.2. Kim et al. (2024) en su estudio “LoRaWAN Optimization for voltage monitoring”, examina los desafíos del uso de las tecnologías inalámbricas para el monitoreo

del voltaje en redes eléctricas de baja tensión (BT) mediante una red de comunicación basada en la tecnología LoRaWAN.

I.3. Odongo et al. (2022) en su artículo “An Efficient LoRa-Enabled Smart Fault Detection and Monitoring Platform for the Power Distribution System Using Self-Powered IoT Devices” menciona que la gestión de redes de distribución, incluida la detección de fallas, es un desafío a los que se encuentran los operadores eléctricos, sin embargo, el despliegue de tecnologías IoT en las infraestructuras de distribución de energía aceleraría en la detección de y localización de fallas. La investigación demostró que los nodos IoT pueden identificar cortes de energía verdaderos discriminándolos de simples fluctuaciones de tensión, logrando una alta precisión y eliminando los falsos positivos

I.4. Guillermo del Campo et al. (2018), en su artículo “Power Distribution Monitoring Using LoRa: Coverage Analysis in Suburban Areas” sobre el desarrollo un sistema de monitoreo de infraestructuras y distribución de gas y electricidad con el uso de sensores de bajo coste y bajo consumo para verificar el estado de los componentes en los centros de transformación, detectar averías, desequilibrios de cargas en y monitorizar los parámetros en torres de alta y media tensión, se utilizó tecnologías LPWAN donde se eligió a LoRaWAN por que presenta costes más bajos y cuenta con mayor cobertura y disponibilidad. El estudio advierte que, si bien la tecnología LoRa tiene un alcance teórico de kilómetros, en entornos suburbanos o con densa vegetación y obstáculos físicos (como la falta de línea de vista), la intensidad de la señal (RSSI) y la entrega de paquetes pueden verse atenuadas drásticamente a distancias menores.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Sistema de monitoreo basado en tecnología LoRa.

Según Molina Moya (2024) un sistema de monitoreo basado en tecnología LoRa se define como una solución tecnológica que permite la recolección, transmisión y visualización de datos provenientes de un entorno físico, a través de una red inalámbrica de largo alcance y bajo consumo energético. Esta tecnología, perteneciente al grupo de redes LPWAN (Low Power Wide Area Network), es utilizada principalmente en contextos donde se requiere establecer enlaces de comunicación a distancias considerables sin depender de infraestructura de red tradicional. El sistema está orientado a facilitar el monitoreo distribuido de variables eléctricas mediante la integración de sensores, microcontroladores, módulos de transmisión LoRa, una plataforma de recepción y gestión de datos.

Para comprender su estructura y funcionamiento, es necesario considerar tres dimensiones fundamentales. La primera es el hardware, que comprende todos los componentes físicos como sensores, placas de desarrollo, módulos LoRa, fuentes de alimentación y elementos de interfaz con el entorno eléctrico. La segunda es el software embebido, responsable de la programación del sistema, la gestión de datos, el control de procesos y la comunicación con la plataforma receptora; este software se implementa en microcontroladores y permite la operación autónoma del sistema. Finalmente, se encuentra la comunicación por radiofrecuencia, centrada en los aspectos relacionados con la calidad y estabilidad del enlace inalámbrico, considerando parámetros como la intensidad de la señal recibida (RSSI), la relación señal-ruido (SNR), la tasa de pérdida de paquetes y el alcance efectivo de transmisión.

2.2.1.1. Hardware

Según Molina Moya (2024) es el conjunto de componentes físicos que permiten la recolección, procesamiento y transmisión de datos provenientes del entorno eléctrico. Este conjunto puede incluir microcontroladores, sensores, módulos de comunicación, interfaces de alimentación, y dispositivos periféricos encargados de la interacción directa con las variables físicas del sistema. Todos estos elementos conforman el subsistema electrónico, cuya función es habilitar la captura de datos en campo y su posterior transferencia mediante tecnologías inalámbricas. En conjunto, el hardware no solo soporta la operación del sistema, sino que también garantiza la interacción efectiva entre el entorno físico y el software encargado de procesar la información.

a. Arduino.

Es una placa de hardware libre que contiene un microcontrolador reprogramable conectados a pines hembra mediante una placa de circuito impresa (PCB) que son las entradas y salidas del microcontrolador permitiendo la conexión con diferentes sensores y actuadores. Una PCB es utilizado para conectar eléctricamente diversos componentes electrónicos, siendo así el Arduino una PCB que está inspirada en otra placa libre preexistente llamada Wiring. Para la programación del Arduino se utiliza un software gratis, libre y de multiplataforma que se instala en el ordenador que permitirá escribir, verificar y cargar en la memoria del microcontrolador de la placa del Arduino las instrucciones que se desea que comience a ejecutar. El lenguaje de programación es el idioma artificial que se emplean para expresar instrucciones que pueden ser entendidas por máquinas y dentro del entorno del Arduino su lenguaje está basado en código C/C++. (Torrente Artero, 2013)

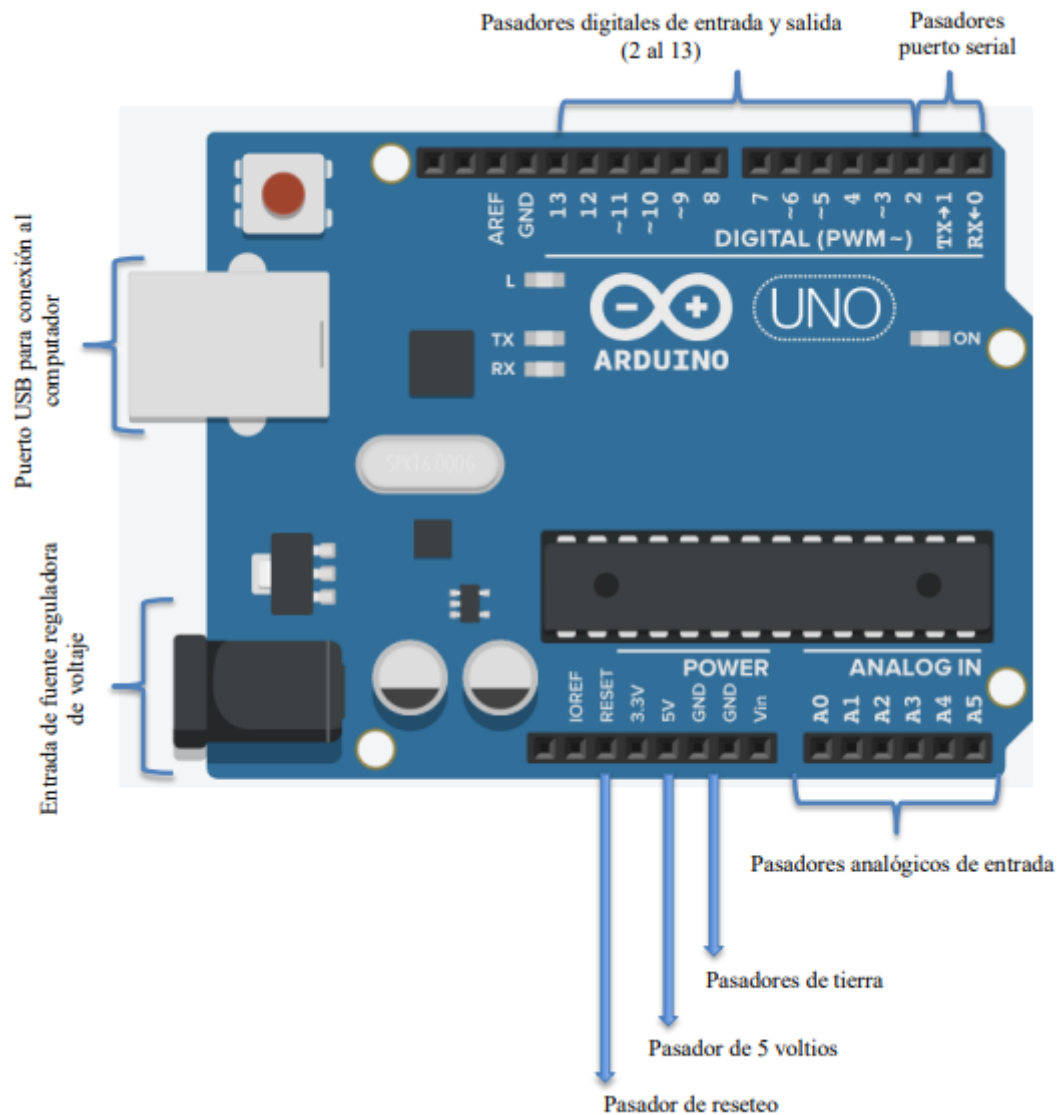


Figura 1. Entradas y salidas del Arduino UNO. (Tupac-Yupanqui et al., 2021)

i) Hardware Arduino

El hardware de Arduino se refiere a una placa física de circuito impreso (PCB) que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines que permiten conectar sensores y actuadores de manera sencilla. Este hardware es considerado libre porque sus esquemas electrónicos están disponibles públicamente, lo que permite a cualquier persona estudiarlo, modificarlo, reproducirlo o mejorarlo. La placa Arduino representa un diseño abierto que fomenta la participación activa de los usuarios, quienes pueden incluso construirla

manualmente si cuentan con los conocimientos y materiales necesarios. Aunque existen diversos modelos con características particulares, todos comparten una arquitectura tecnológica similar, basada principalmente en microcontroladores de tipo AVR fabricados por Atmel. (Torrente Artero, 2013)

ii) Microcontrolador Arduino

EL modelo que se usa en el Arduino UNO es un modelo ATmega328P de la marca Atmel, donde la “P” significa que incorpora tecnología “Picopower” quiere decir que este modelo tiene un consumo energético menor comparado con su equivalente sin “P”, este modelo cuenta con 28 patillas o pines de entrada y salida del microcontrolador, 13 de las cuales son E/S digitales y 5 son salidas analógicas y cuentan también con salidas de tensión reguladas de 5V, 3.3V y GND, además que muchos de los pines cuentan con doble función, no solamente son pines de entrada o salida sino que tiene integrado funciones preprogramadas para la comunicación entre dispositivos, para la entrada o emisión de datos directos al microcontrolador, Etc. El microcontrolador ATmega328P cuenta con una memoria flash de 32KB pero no se puede usar íntegramente toda su capacidad porque se ocupan 512 bytes para el “bootloader” o gestor de arranque, también para una memoria SRAM de 2KB para una memoria volátil y una memoria EEPROM con una capacidad de 1KB para su almacenamiento, sin embargo si se desea ampliar estas memorias puede realizarse conectado usando memorias SRAM o EEPROM externas y conectarlas al microcontrolador mediante protocolos de comunicación llamadas SPI o I²C. Para la conexión USB del Arduino se soporta de un chip llamado ATmega16U2 o para modelos más simples el chip FTDI que sirve como un traductor para el microcontrolador ATmega328P y el protocolo USB. (Torrente Artero, 2013)

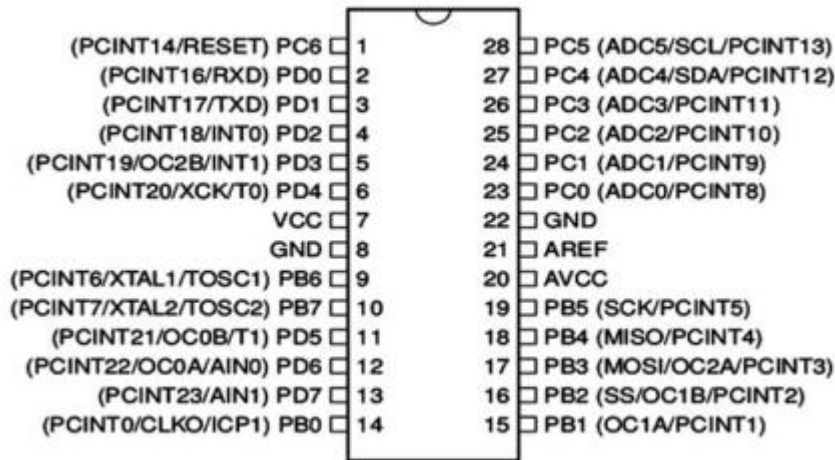


Figura 2. Pines del microcontrolador ATmega32P. (Torrente Artero, 2013)

iii) Software Arduino

El software de Arduino es un conjunto de herramientas y entornos de desarrollo que permite programar las placas de esta plataforma. Se trata de un software libre y multiplataforma, lo que significa que puede ser utilizado, modificado y distribuido sin restricciones. Su entorno de desarrollo integrado (IDE) facilita la escritura, verificación y carga de programas en el microcontrolador de la placa, utilizando un lenguaje basado en una versión simplificada de C/C++, accesible incluso para personas sin experiencia previa en programación. Este software se distribuye bajo licencias GPL y LGPL, lo que ha favorecido la creación de una comunidad activa que colabora constantemente en su mejora, ampliación de funcionalidades y corrección de errores. Gracias a esta filosofía abierta, Arduino se ha consolidado como una herramienta versátil y accesible para el desarrollo de proyectos electrónicos y didácticos. (Torrente Artero, 2013)

b. Tecnología LoRa.

LoRa (Long Range) es una tecnología de modulación de espectro ensanchado por chirp desarrollada para aplicaciones de redes de área amplia y bajo consumo de energía (LPWAN). Utiliza bandas de frecuencia sin licencia (como la de 868 MHz en

Europa) y permite ajustar parámetros como el ancho de banda, el factor de dispersión (Spreading Factor, SF) y la tasa de codificación, lo que permite alcanzar largas distancias de comunicación y una alta sensibilidad del receptor (hasta -137 dBm con SF12). Las transmisiones con distintos factores de dispersión se consideran cuasi ortogonales, lo que permite a múltiples dispositivos compartir eficientemente el canal. Esta tecnología se emplea principalmente en aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT), como monitoreo ambiental, agricultura de precisión o rastreo de activos, especialmente en entornos rurales o de difícil acceso. (Verde Romero et al., 2024)

De acuerdo a Kaur et al. (2024) la tecnología LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica desarrollada por Semtech, diseñada específicamente para aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT) que requieren bajo consumo de energía y cobertura a larga distancia. Opera en bandas de frecuencia no licenciadas (como 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz), y se caracteriza por su capacidad de ajustar parámetros como el factor de dispersión (Spreading Factor, SF), la tasa de codificación (Coding Rate, CR), el ancho de banda y la potencia de transmisión, permitiendo optimizar el rendimiento del enlace según el entorno y la aplicación. LoRa es ideal para entornos donde se necesita enviar datos de forma ocasional y a bajo costo, y ha demostrado ser especialmente útil en escenarios con obstáculos físicos y restricciones energéticas, como edificios o zonas urbanas densas

i) Arquitectura de red LoRa

LoRa es una capa física de comunicación de largo alcance que mediante la agregación de la capa MAC se estandarizó y amplió mediante LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) esta define que la arquitectura de la red y el protocolo de comunicación LoRaWAN está estandarizada y es de código abierto por la alianza LoRa. La mayoría de tecnologías actuales se basan en redes de malla, en una red de malla los nodos

reciben y transmiten datos que llegan a ser irrelevantes para él por lo que el consumo de energía aumenta, es por eso que LoRaWAN se basa en una topología del tipo estrella, donde se disminuye el consumo de energía y también la complejidad de la red.(Devalal & Karthikeyan, 2018)

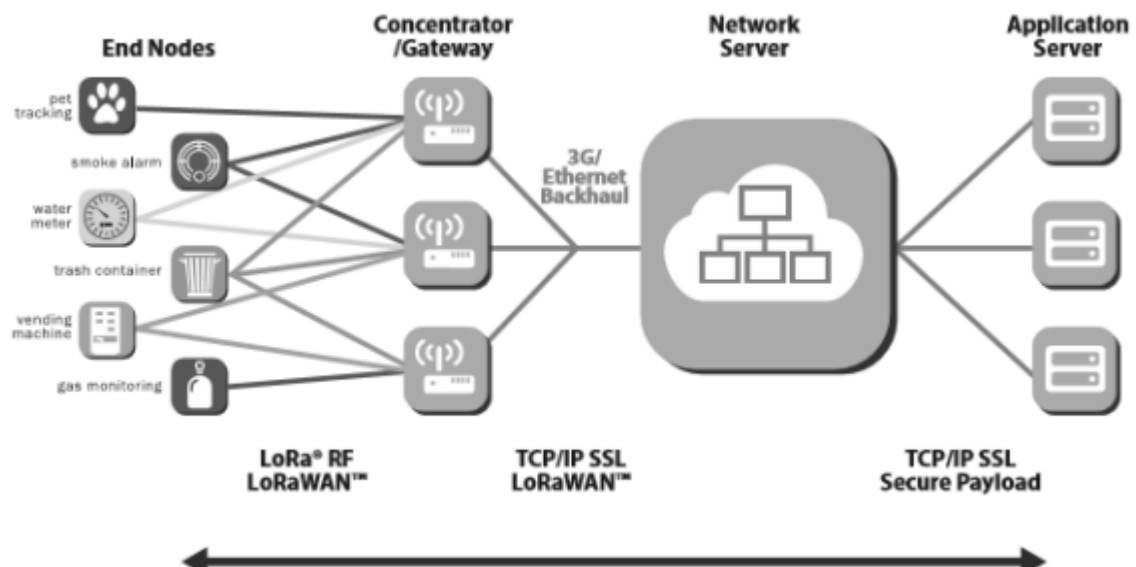


Figura 3. Arquitectura de Red del LoRaWAN . (Devalal & Karthikeyan, 2018)

ii) LoRaWAN y sus clases.

LoRaWAN es el nombre de la arquitectura de la red inalámbrica de área amplia, esta arquitectura está diseñada para dispositivos de bajo consumo energético, usados generalmente para aplicaciones relacionadas al Internet de las Cosas, una red LoRaWAN cuenta con una topología tipo Estrella de Estrellas que se encuentra compuesta por cuatro elementos principales: nodos, gateways, servidores de red y un servidor de aplicación, los nodos son sensores y actuadoras los cuales comparten con el Gateway la información adquirida, por su parte el gateway recepta la información y comparte con el servidor mediante una comunicación basada en un protocolo IP, este protocolo permite que se recopile en un mismo Gateway la información de varios nodos ubicados a diferentes

distancias hasta kilómetros mediante una comunicación unidireccional o bidireccional. (Heredia Rivadeneria & Lucero Andrade, 2021)

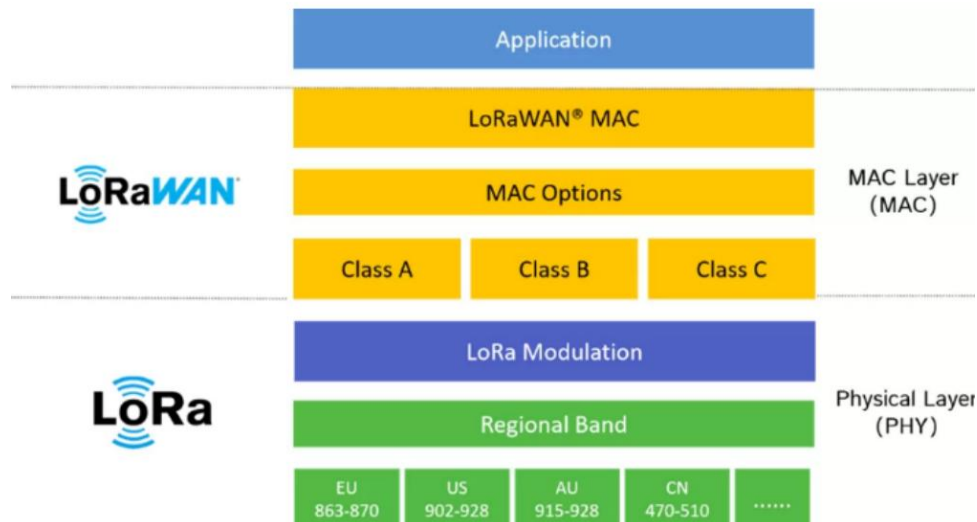


Figura 4. LoRa y LoRaWAN. (Molina Moya, 2024)

Como indica Heredia Rivadeneria & Lucero Andrade (2021) existen tres clases de nodos en LoRaWAN, cada una de ellas con sus características que permiten a usuario realizar diferente tipo de comunicaciones que dependerá del consumo energético del nodo, estas clases son:

- **Clase A:** Este nodo soporta a la mayoría de nodos, permite una comunicación bidireccional, se realiza la recepción de información durante intervalos de tiempo largos la cual permite tener un buen rendimiento en el consumo de la batería dado que en cada intervalo el nodo entra en modo suspensión, se recomienda el uso de esta clase para aquellos dispositivos que funcionen alimentados por una batería.
- **Clase B:** Es similar a la clase A, pero esta clase permite que los intervalos de tiempo de la recepción de información sean programables, lo cual permite que el consumo energético sea bajo pero mayor al de la clase A.

- **Clase C:** Esta clase se encuentra operando continuamente, siempre en cuando no este transmitiendo, esto provoca que el consumo de energía sea mayor a las clases anteriores, pero proporciona una mejor comunicación.

c. Sensores

De acuerdo con Corona Ramírez et al. (2014) los sensores constituyen dispositivos fundamentales en los sistemas de adquisición de datos, ya que permiten establecer una interacción directa entre un entorno físico y un sistema electrónico. En términos generales, un sensor es un componente capaz de detectar una magnitud física y convertirla en una señal eléctrica proporcional que pueda ser interpretada por un sistema de procesamiento, como un microcontrolador o un computador.

Desde el punto de vista funcional, los sensores operan como transductores que transforman energía no eléctrica en señales eléctricas, permitiendo así el monitoreo y control de diversas variables del entorno. Esta capacidad resulta especialmente relevante en aplicaciones de automatización, instrumentación electrónica y sistemas embebidos, donde es necesario obtener información precisa y en tiempo real para la toma de decisiones.

En el contexto de plataformas como Arduino, los sensores juegan un papel crucial al facilitar el desarrollo de sistemas interactivos y autónomos. Estas plataformas permiten integrar diversos tipos de sensores de forma sencilla, lo que posibilita la creación de soluciones tecnológicas aplicables a campos como la domótica, la robótica, el monitoreo ambiental, la agricultura de precisión, entre otros.

Por tanto, el sensor no solo representa un elemento físico de medición, sino también un puente entre el mundo real y los sistemas digitales, permitiendo a estos

últimos adquirir conocimiento del entorno y responder de manera inteligente ante distintos estímulos.

2.2.1.2. Software embebido

Según Hernández Vega José Isidro (2010) el software embebido es una categoría especializada de software que se integra en sistemas físicos específicos para controlar funciones concretas dentro de dispositivos electrónicos. A diferencia del software convencional que se ejecuta en computadoras personales o servidores, el software embebido opera en plataformas como microcontroladores, procesadores digitales de señal o sistemas industriales. Su principal característica es la interacción directa con el entorno físico mediante sensores y actuadores, lo que le permite ejecutar tareas como control, monitoreo o procesamiento de señales en tiempo real. Este tipo de software suele estar diseñado para una función específica, lo que implica altos niveles de confiabilidad y eficiencia operativa, especialmente en contextos con recursos de hardware limitados.

El desarrollo del software embebido implica retos particulares, ya que debe garantizar un desempeño óptimo en entornos que requieren respuestas inmediatas y precisas. Por ello, se emplean metodologías y herramientas adaptadas que aseguren su calidad desde la fase de diseño. Este tipo de software tiene un papel fundamental en diversas aplicaciones tecnológicas modernas, desde dispositivos médicos y automóviles hasta sistemas de automatización industrial y soluciones de consumo masivo. Su capacidad para dotar de inteligencia a sistemas electrónicos lo convierte en un componente clave en la evolución de los dispositivos inteligentes y en el avance de la tecnología en general.

a. Entorno de programación IDE Arduino

Es el encargado de programar en base a las utilidades que contiene el lenguaje de programación, proviene del inglés “Integrated Development Environmen” y es la

interfaz donde uno puede programar y compilar el software desarrollado, es donde se puede escribir, editar y depurar el código a emplear, asimismo contiene un generador para la interfaz gráfica de usuario. (GUI). (Alan Cabrera & Percy Condori, 2024)

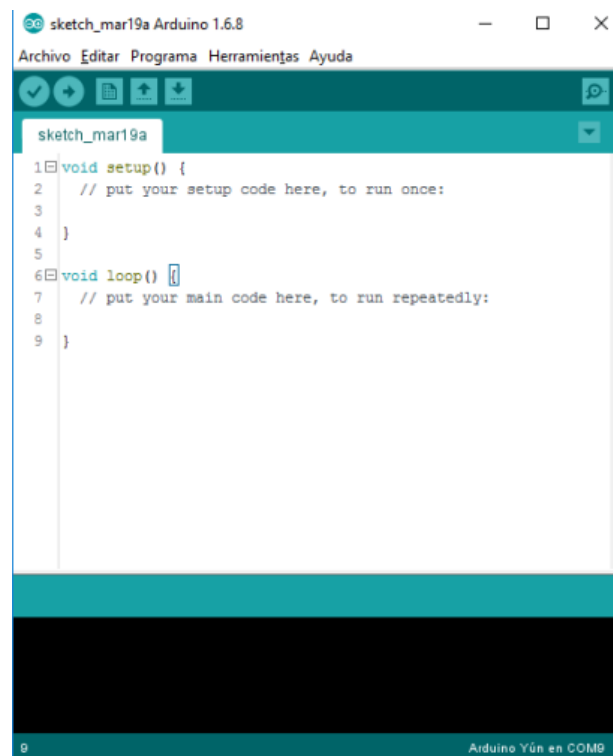


Figura 5. Entorno de desarrollo de IDE Arduino Versión 1.6.8. (Alan Cabrera & Percy Condori, 2024)

2.2.1.3. Comunicación por radio frecuencia

En el campo de la automatización y telegestión a fin de evitar el uso de conexiones cableadas se emplea la tecnología inalámbrica por medio de la radio frecuencia, al día de hoy existen ZigBee, Bluetooth, LoRa, Wi-Fi como tecnologías para la telegestión de forma inalámbrica, Bluetooth, ZigBee y Wi-Fi tiene sus propias limitaciones, Bluetooth es un protocolo de comunicación pero de corto alcance, ZigBee ofrece un alcance de comunicación hasta 200 metros, Wi-Fi cubre un rango de comunicación hasta de 100 metros, por otro lado LoRa es una tecnología LPWAN que opera una comunicación inalámbrica muy larga y

opera a bandas de frecuencia sin licencia con un bajo consumo de energía. (Proaño Guevara et al., 2024).

Tabla 1. Comparación entre las principales tecnologías de comunicación por radio frecuencia.

Tecnología de comunicación	Rango de Cobertura	Consumo de Energía	Velocidad de Transmisión	Frecuencia y Alcance	Costo de Implementación	Topología de Red	Seguridad
ZigBee	Rango de cobertura moderado. Adecuado para aplicaciones en áreas relativamente pequeñas	Consumo de energía eficiente. Adecuado para dispositivos de bajo consumo.	Velocidades de datos moderadas, adecuadas para aplicaciones de control y monitoreo, generalmente de 20-250kbps.	Opera en frecuencias de 2.4 GHz o 900 MHz, dependiendo de la región, con un alcance de 10-100 metros.	Suelen ser más económico que Wi-Fi o Bluetooth en términos de hardware, pero los costos pueden variar según la implementación específica.	Utiliza una topología de malla, lo que significa que los dispositivos pueden actuar como enrutadores y extender la red. Esto permite una mayor robustez y alcance.	Ofrecen opciones de seguridad, pero la implementación y configuración adecuadas son fundamentales para garantizar la protección de datos.
Bluetooth	Rango de cobertura corto. Adecuado para aplicaciones de control a la proximidad.	Eficiente en consumo de energía en las últimas versiones de Bluetooth (Bluetooth Low Energy o BLE).	Velocidades de datos relativamente altas en comparación con ZigBee, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren transmisiones de datos más rápidas, hasta 1 - 3 Mbps en Bluetooth 5.	Opera en la banda de 2.4 GHz y tiene un alcance de aproximadamente 100 metros en su versión clásica y hasta 300 metros en Bluetooth 5.	Económico especialmente en aplicaciones de corto alcance.	Principalmente usa una topología tipo estrella o punto a punto, adecuada para aplicaciones de corto alcance con dispositivos emparejados.	Ofrecen opciones de seguridad robustas, pero la implementación y configuración adecuadas son fundamentales para garantizar la protección de datos.

LoRa	Rango de cobertura extremadamente amplio. Ideal para áreas extensas.	Muy eficiente en consumo de energía, lo que permite una larga duración de la batería en dispositivos alimentados por batería.	Velocidades de datos bajas a moderadas, generalmente en el rango de 0.3 - 50 kbps, pero su ventaja radica en su capacidad de transmitir datos a larga distancia.	Opera en frecuencias ISM (Industrial Scientific and Medical) en rangos de 433 MHz, 868 MHz o 915 MHz, con largo alcance desde 5 hasta 30 kilómetros.	La infraestructura LoRa puede ser costosa de implementar, pero puede ser rentable a largo plazo debido a su eficiencia energética y de alcance.	Utiliza una topología de estrella, donde los nodos transmiten directamente a una estación base. Puede ser extendida con repetidores para aumentar el alcance. Además, puede trabajar en topología malla tal como la topología ZigBee.	La seguridad suele implementarse a nivel de aplicación, que significa que la seguridad depende en gran medida de como se configure y se implemente en la aplicación específica.
Wi-Fi	Rango de cobertura moderado a largo, dependiendo de la configuración de la red.	Consumo de energía más alto en comparación con las otras tecnologías.	Velocidades de datos muy altas desde 600 Mbps a varios Gbps, dependiendo de la normal y la configuración, ideales para aplicaciones que requieren transmisores de datos intensivos, pero su consumo de energía es mayor.	Utiliza principalmente 2.4 GHz o 5 GHz con un alcance típico de 30 - 100 metros, aunque se pueden utilizar antenas y equipos especiales para extender el alcance.	Costosa en términos de infraestructura y consumo de energía en comparación con las otras tecnologías.	Generalmente emplea una topología de estrella o de infraestructura con un punto de acceso central.	Ofrecen opciones de seguridad robustas, pero la implementación y configuración adecuadas son fundamentales para garantizar la protección de datos.

Fuente: Proaño Guevara et al. (2024)

2.2.2. Detección de interrupciones.

Becerra Benavides (2023) indica que la detección de interrupciones en redes de distribución eléctrica, también conocida como detección de fallas, corresponde al conjunto de

procedimientos mediante los cuales se identifica la presencia de anomalías que afectan la continuidad del servicio eléctrico. Esta función es parte fundamental de los sistemas de supervisión y protección, ya que permite reconocer alteraciones en las condiciones operativas de la red, facilitando la posterior intervención técnica para su análisis y corrección.

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversos métodos para este fin, los cuales van desde inspecciones visuales hasta tecnologías basadas en monitoreo automatizado. Estos métodos posibilitan la diferenciación de los tipos de interrupciones (por ejemplo, monofásicas, bifásicas o trifásicas) y su localización dentro de la red, incluso en sistemas con generación distribuida, donde las condiciones de operación pueden modificar el comportamiento habitual de las señales eléctricas

2.2.2.1. Calidad de la detección de señales

Cabezas Ruiz Beltrán (2025) indica que la calidad de la detección en sistemas de comunicación inalámbrica suele expresarse a través del indicador RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), el cual representa la intensidad con la que una señal de radiofrecuencia es recibida por un dispositivo. Este valor permite estimar el nivel de potencia de la señal tras haber sido afectada por obstáculos físicos, interferencias electromagnéticas o la distancia entre el emisor y el receptor. En términos prácticos, el RSSI se mide en valores negativos, y mientras más cercano esté a cero, mayor será la potencia recibida, lo que se traduce en una señal de mejor calidad.

La interpretación del RSSI resulta esencial para evaluar el desempeño de una red inalámbrica, ya que está directamente relacionada con la estabilidad y confiabilidad de la comunicación. Una señal con RSSI elevado suele implicar menor latencia, menor pérdida de paquetes y mayor eficiencia en la transmisión de datos. Este parámetro también es utilizado en algoritmos de localización en interiores y en procesos de mapeo de

cobertura, donde se busca identificar zonas con buena o deficiente recepción. Por tanto, la calidad de la detección, evaluada mediante RSSI, no solo permite determinar el nivel de conectividad, sino que también orienta decisiones sobre la distribución de dispositivos, la optimización de la infraestructura y la mejora de la experiencia del usuario en entornos con comunicación inalámbrica.

2.2.2.2. Precisión en la detección de señales

Cabezas Ruiz Beltrán (2025) menciona que la precisión en la detección, en sistemas de comunicación por radiofrecuencia, se refiere al grado con el que las señales emitidas por un dispositivo transmisor son recibidas de forma íntegra por el receptor. Este concepto está asociado a la cantidad de paquetes correctamente recibidos en relación con los paquetes transmitidos, y se ve influenciado por aspectos como el entorno físico, la calidad del canal de comunicación, el nivel de señal (RSSI) y las condiciones del hardware involucrado.

Cuando la precisión en la detección es baja, se presentan pérdidas de paquetes, lo que puede generar interrupciones o vacíos en la información transmitida. Por el contrario, valores altos de precisión indican una mayor correspondencia entre lo enviado y lo recibido. Este parámetro resulta relevante en aplicaciones de monitoreo inalámbrico, ya que condiciona la disponibilidad y continuidad de los datos necesarios para interpretar eventos o comportamientos del entorno.

La relación señal a ruido, conocida por sus siglas en inglés como SNR (Signal-to-Noise Ratio), se define como la diferencia entre la potencia de una señal deseada y la potencia del ruido presente en el mismo canal de transmisión de acuerdo a la Ecuación (1). Este parámetro se expresa en decibelios-milivatios (dBm) y se calcula como la resta entre el nivel de señal recibido (por ejemplo, mediante RSSI) y el nivel de ruido medido en el entorno.

En términos generales, valores más altos de SNR indican una señal más clara, ya que el componente útil supera ampliamente al ruido de fondo

$$\text{Margen SNR} = \text{señal (dBm)} - \text{ruido (dBm)}$$

(1)

Tabla 2. Relación calidad de la conexión.

RSSI	Ruido	SNR	Calidad de la conexión
Alto (-50 dBm)	Bajo (-90 dBm)	Alto (40 dBm)	Alta calidad de la conexión, tanto la señal como la calidad de esta son excelentes, permitiendo una velocidad alta y una latencia baja.
Alto (-50 dBm)	Alto (-70 dBm)	Bajo (20 dBm)	Buena señal, pero baja calidad de conexión, a pesar de que la señal (RSSI) es alta, el ruido reduce en gran medida la calidad de la conexión pudiendo dar lugar a interferencias y una velocidad más baja de la esperada.
Bajo (-80 dBm)	Bajo (-90 dBm)	Bajo (10 dBm)	Baja calidad de conexión, la señal es baja y aunque el ruido también, la conexión resulta en una conexión inestable.
Bajo (-80 dBm)	Alto (-70 dBm)	Muy bajo (10 dBm)	Debido al bajo SNR, los datos no pueden ser transmitidos de manera eficiente, lo que provoca pérdidas de paquetes y caídas frecuentes, ya que el dispositivo y el AP luchan por mantener conexión en un entorno con un nivel de ruido tan alto.

Fuente: Cabezas Ruiz Beltrán (2025)

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Redes Eléctricas Inteligentes

Según el autor Donato et al. (2022) de la investigación “Revisión de aplicaciones de técnicas de monitoreo no intrusivo de cargas en redes eléctricas inteligentes”, las redes eléctricas inteligentes (REI) son una evolución de la red eléctrica tradicional que integran tecnologías modernas de información y comunicaciones (TIC), junto con sistemas de generación distribuida y almacenamiento de energía. Estas redes permiten gestionar de

manera más eficiente y en tiempo real la distribución de energía, mejorando la calidad del servicio, reduciendo pérdidas, controlando el flujo de energía, y habilitando funciones avanzadas como la medición de consumo en tiempo real y la gestión activa de la demanda. Además, las REI incorporan dispositivos como medidores inteligentes y algoritmos de monitoreo no intrusivo (NILM), lo cual abre nuevas posibilidades para el análisis del consumo, la identificación de fallas, la restauración automática del servicio y la asistencia en contextos sociales, como el monitoreo de personas mayores en entornos domésticos.

2.3.2. Sistemas de monitoreo eléctrico

2.3.2.1. Sistemas SCADA

Un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) es una plataforma tecnológica desarrollada para supervisar, controlar y adquirir datos de manera remota en sistemas eléctricos, especialmente en subestaciones. Estos sistemas permiten monitorear en tiempo real variables críticas como mediciones eléctricas, estados operativos de equipos, y realizar maniobras de control desde un centro de operaciones, reduciendo significativamente los tiempos de respuesta ante fallas. Desde su aparición en los años 60, los SCADA han evolucionado hacia arquitecturas más abiertas y flexibles, integrando dispositivos electrónicos inteligentes (IED) y utilizando estándares de comunicación como el IEC-60870-5-101 y el IEC-61850. Esta evolución busca superar las limitaciones de los sistemas cerrados, que obligaban a depender de un solo fabricante, dificultando la interoperabilidad y el crecimiento de la infraestructura eléctrica.(Gallardo, 2022)

Según Barón Martínez & Torres Ortega (2017) un sistema SCADA es una herramienta de software diseñada para permitir el acceso remoto a los datos de un proceso y su control, mediante el uso de tecnologías de comunicación adecuadas. Aunque no se trata de

un sistema de control en sí mismo, cumple una función clave como interfaz entre los niveles de control operativos como controladores o RTUs y los niveles superiores de gestión.

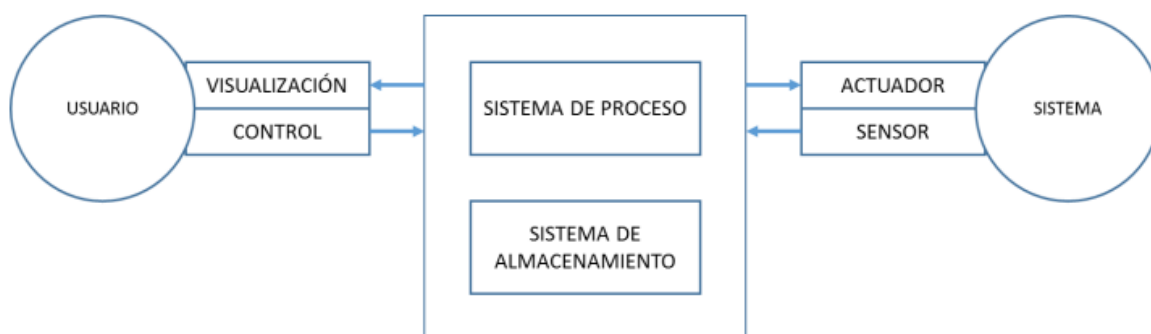


Figura 6. Esquema general de un sistema SCADA. (Barón Martínez & Torres Ortega, 2017)

Según Ronquillo Escobar Angeline Desire (2022) es un sistema tecnológico que permite la supervisión, el control y la adquisición de datos en procesos eléctricos, como los que se desarrollan en subestaciones. Este tipo de sistema utiliza una arquitectura que integra equipos electrónicos inteligentes, dispositivos de protección y control, junto con una plataforma de software especializada para monitorear y gestionar el estado operativo de los equipos a distancia. El sistema SCADA está diseñado para facilitar el monitoreo remoto en tiempo real, reducir la necesidad de intervención directa del personal en campo y optimizar la eficiencia operativa del sistema eléctrico. Entre sus principales características se encuentran la supervisión y el control remoto de dispositivos, la generación automática de alertas ante fallas o anomalías, la modificación de parámetros operativos desde cualquier ubicación, y la elaboración de reportes técnicos que permiten evaluar el funcionamiento del sistema.

2.3.2.2. Sistemas AMI (Advanced Metering Infrastructure)

Un sistema AMI (Advanced Metering Infrastructure) es una infraestructura tecnológica que integra medidores inteligentes, sistemas de comunicación y plataformas de gestión de datos, diseñada para habilitar una interacción bidireccional entre los operadores del sistema eléctrico y los usuarios finales. El sistema AMI permite recopilar,

transmitir y gestionar en tiempo real datos relacionados con el consumo eléctrico, facilitando la toma de decisiones tanto por parte del usuario como del proveedor. Este tipo de sistemas contribuye a la modernización de las redes eléctricas, habilitando funcionalidades como la detección de fallas, la gestión de la demanda, la tarificación dinámica y la integración de generación distribuida, al tiempo que mejora la eficiencia operativa, la calidad del servicio y la participación activa del usuario en la cadena energética. (Téllez Gutiérrez et al., 2018)

De acuerdo a Ulloa-Vásquez et al. (2021) un sistema AMI es una plataforma tecnológica que permite la automatización y la recopilación de datos desde medidores inteligentes, con capacidad de comunicación en tiempo real. Esta infraestructura forma parte fundamental de las redes eléctricas inteligentes y se basa en la integración de tecnologías de comunicación alámbricas e inalámbricas para garantizar el flujo continuo y bidireccional de datos entre los usuarios, los equipos de medición y los centros de control. El sistema AMI no solo facilita el registro automático del consumo energético, sino que también permite gestionar remotamente el servicio, optimizar precios de acuerdo al consumo, y mejorar la eficiencia operativa del sistema eléctrico. Se estructura a través de redes jerárquicas como la HAN (Home Area Network), NAN (Neighborhood Area Network) y WAN (Wide Area Network), y puede integrar tecnologías como fibra óptica, PLC, WiMAX, LTE, ZigBee, entre otras, adaptándose a los diferentes niveles de la red eléctrica

2.3.2.3. Sistema de monitoreo basados en IoT

Según el autor Chanchí-Golondrino et al. (2022) en su artículo de investigación “Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana”, un sistema de monitoreo basado en IoT es una arquitectura tecnológica que integra sensores, dispositivos de comunicación, almacenamiento de datos y análisis automatizado para recopilar y procesar información sobre variables ambientales en tiempo

real. Este tipo de sistema se estructura comúnmente en cuatro capas funcionales: captura, almacenamiento, análisis y visualización. En la capa de captura se utilizan sensores conectados a placas de hardware libre para medir variables como temperatura, humedad y luminosidad. Estos datos son transmitidos mediante Wi-Fi y almacenados en bases de datos no relacionales. Posteriormente, en la capa de análisis, los datos son procesados mediante estadísticas descriptivas y modelos de aprendizaje automático (supervisado y no supervisado) con el fin de identificar patrones, clasificar condiciones y apoyar la toma de decisiones. Finalmente, en la capa de visualización, los resultados se presentan gráficamente en tiempo real para facilitar su interpretación por parte del usuario. El sistema propuesto en este documento demuestra que la implementación de tecnologías IoT con herramientas de software y hardware libre permite realizar un monitoreo eficiente, flexible y escalable en contextos como la agricultura urbana, con la posibilidad de adaptar el sistema a otros escenarios de monitoreo ambiental o productivo.



Figura 2. Metodología para la elaboración de un sistema IoT. (Chanchí-Golondrino et al., 2022)

2.3.2.4. Plataforma de monitoreo en la nube

Según el autor Zuñiga Huamani (2025) en su tesis “Diseño e implementación de un sistema de monitoreo en nube de alimentación ininterrumpida Kaise de Tempel Perú”, una plataforma de monitoreo en la nube es un sistema tecnológico que permite supervisar y gestionar remotamente, en tiempo real, el estado operativo de equipos eléctricos críticos, como los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS). Este tipo de plataforma utiliza herramientas como Zabbix, junto con protocolos de comunicación como SNMP, para

recolectar datos, emitir alertas automáticas y presentar métricas detalladas a través de una interfaz web centralizada. Una de las principales características que diferencia a estas plataformas de los sistemas tradicionales es su capacidad de acceso remoto desde cualquier ubicación mediante internet, eliminando la necesidad de estar físicamente en el sitio para realizar diagnósticos o mantenimientos. Esto reduce significativamente los tiempos de respuesta ante fallas, mejora la planificación del mantenimiento preventivo y disminuye los costos operativos, en contraste con los sistemas anteriores que requerían soporte técnico presencial o videollamadas para resolver incidencias.

2.3.3. Interrupciones en Sistemas Eléctricos de Distribución.

Cortez Calderón (2017) menciona que las interrupciones en sistemas eléctricos de distribución son eventos que afectan la continuidad del servicio eléctrico, pudiendo ser programadas, como parte de labores de mantenimiento, o no programadas, causadas por fallas inesperadas. Estas últimas suelen generarse por fenómenos atmosféricos, errores operativos, variaciones abruptas de carga o problemas técnicos en la red. Las interrupciones no programadas implican cortes súbitos en el suministro eléctrico, y pueden afectar una, dos o las tres fases del sistema. Cada tipo de interrupción genera un comportamiento distinto en términos de voltaje y corriente, dependiendo de la naturaleza de la falla y la impedancia involucrada. Estas interrupciones no solo comprometen la estabilidad del sistema, sino que también ocasionan pérdidas económicas para las empresas distribuidoras y afectan directamente al usuario final, al incrementar la Energía No Suministrada (ENS).

Por ello, la rápida y precisa localización de estas fallas es esencial para restaurar el servicio en el menor tiempo posible y mejorar la confiabilidad de los sistemas de distribución eléctrica.

Una interrupción del servicio eléctrico se define como toda falta de suministro de energía eléctrica en un punto de entrega, cuya duración sea igual o superior a tres (3) minutos, independientemente de su causa u origen. Este evento puede afectar a una o más instalaciones del sistema de generación, transmisión o distribución, y tiene implicancias tanto técnicas como regulatorias, especialmente cuando se considera su impacto en la calidad del servicio percibido por los usuarios. (OSINERGMIN, 2023)

Tipo de falla	Descripción
Falla monofásica a tierra	Ocurre cuando una fase entra en contacto directo con tierra o con estructuras conectadas a tierra. Es la más común en sistemas de media tensión.
Falla bifásica	Implica un cortocircuito entre dos fases sin involucrar tierra. Genera corrientes elevadas y posibles daños en conductores o transformadores.
Falla bifásica a tierra	Se produce cuando dos fases hacen contacto simultáneo con tierra. Es más severa que la monofásica por la mayor magnitud de corriente de falla.
Falla trifásica	Involucra cortocircuito entre las tres fases. Aunque menos frecuente, es la más grave y puede provocar desconexión inmediata de subestaciones.
Falla por sobrecarga	No es una “falla” clásica, pero un sobreconsumo sostenido puede causar sobrecalentamiento, activar protecciones y provocar interrupciones.
Falla intermitente o transitoria	Dura milisegundos o segundos; suele despejarse automáticamente. Afecta la calidad del suministro, sobre todo en zonas rurales y urbano-rurales.

Tabla 3. Tipo de fallas eléctricas

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.1. Indicadores de la duración y frecuencia de interrupciones en SED's.

a. Calidad de suministro

Se refiere a la continuidad del servicio eléctrico que una empresa distribuidora ofrece a sus usuarios. Implica que la energía suministrada debe estar disponible de forma constante y sin interrupciones significativas. La calidad de suministro se evalúa mediante indicadores históricos predictivos, como SAIDI y SAIFI, que permiten medir tanto la duración como la frecuencia de las interrupciones. Según la NTCSE (Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos), este concepto incluye también la cantidad de energía no suministrada por causa de dichas interrupciones. (Papuico Limaymanta, 2025)

b. SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

Es el índice de duración promedio de interrupciones del sistema, y mide el tiempo total que, en promedio, un cliente está sin servicio eléctrico en un periodo determinado, expresado generalmente en horas o minutos. Se calcula como el total de minutos (o horas) de interrupción multiplicado por el número de usuarios afectados, dividido entre el total de usuarios del sistema. Este indicador está relacionado con factores como la ubicación de las fallas, los recursos de reposición disponibles (cuadrillas, vehículos, materiales), y la accesibilidad geográfica. (Papuico Limaymanta, 2025)

c. SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)

Es el índice de frecuencia promedio de interrupciones del sistema, y mide cuántas veces, en promedio, un cliente experimenta interrupciones del suministro eléctrico en un año. Se calcula dividiendo el número total de interrupciones entre el número total de usuarios del sistema. Este indicador refleja la frecuencia con la que ocurren fallas en los componentes del sistema, y es influido por condiciones internas (como diseño de red o

estado de las instalaciones) y externas (como fenómenos climáticos o terceros). (Papuico Limaymanta, 2025)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar De Ejecución

El trabajo de investigación se desarrollará en el campus de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en el distrito de Rupa Rupa, Provincia de Leoncio Prado, Departamento de Huánuco.

3.2. Materiales y Métodos

- Materiales: Diario de campo, sensores de tensión y actuadores.
- Equipos: Laptop ASUS TUF F15.
- Software: Microsoft Office, Arduino IDE, AutoDesk TinKerCaD, AutoCAD.
- Arduino NANO CH340F
- LoRa SX1278 433MHz
- Antena 433MHz
- Display Alfanumérico LCD LC1622
- Sensor ZMPT101B

3.2.1. Tipo De Investigación

Según la clasificación planteada por Espinoza Montes (2014) el tipo de la presente investigación es aplicada porque se tiene la finalidad de desarrollar un sistema funcional que integra tecnología LoRa para el monitoreo de interrupciones en redes de distribución eléctrica.

3.2.2. Nivel de investigación

De acuerdo a Espinoza Montes (2014) el nivel de la investigación corresponde a la investigación descriptiva, ya que se orienta a resolver una necesidad práctica que se tiene identificada como es la mejora en la detección de interrupciones intempestivas en el sistema

eléctrico. Este nivel se centra en utilizar conocimientos previos para diseñar una solución útil y operativa y llevarla a la práctica.

3.2.3. Enfoque De Investigación

Es una investigación con enfoque cuantitativo ya que se centra en medir y cuantificar variables, y de acuerdo a Hernández Sampieri et al., (2014) mencionan que el enfoque cuantitativo tiene la característica de estimar y medir magnitudes de los fenómenos o de los problemas de la investigación.

3.2.4. Diseño De Investigación

De acuerdo a Arias Odón (2012), el diseño típico de una investigación cuasi experimental es de pretest-posttest por lo que no existe similitud entre grupos.

Grupo experimental intacto	pretest	tratamiento	posttest
Grupo control intacto	pretest	---	posttest
Ge I	O1	X	O2
Ge I	O1	---	O2

Figura 3. Diseño de una investigación cuasi-experimental.(Arias Odón, 2012)

3.2.5. Población

La población de la investigación es la extensión de las redes eléctricas de distribución que alimenta de energía eléctrica a las viviendas en la provincia de Leoncio Prado.

3.2.6. Muestra

La muestra será intencional, que según Arias Odón Fideas Gerardo (2012) son muestras escogidas en base a criterios del investigador, la muestra será simulación de una sección de la red eléctrica de distribución, tomando datos cada 20 metros evaluando el funcionamiento del sistema.

3.2.7. Variables De La Investigación

3.2.7.1. **Independiente:** Sistema de monitoreo basado en tecnología LoRa.

Es un sistema que utiliza la tecnología LoRa para el monitoreo remoto de redes eléctricas de distribución. Está diseñado para detectar, transmitir y reportar datos de interrupciones y variaciones en las redes eléctricas, aprovechando la capacidad de LoRa para comunicar información a larga distancia con bajo consumo de energía. (Odongo et al., 2022)

3.2.7.2. **Dependiente:** Detección de interrupciones en redes de distribución eléctrica.

Es la detección y reporte del sistema de monitoreo de una anomalía o interrupción de la red eléctrica. (Kim et al., 2024)

3.2.8. Operacionalización De Las Variables

Tabla 4. Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Variable Independiente: Sistema de monitoreo basado en tecnología LoRa	Es una solución tecnológica que utiliza comunicaciones de largo alcance y bajo consumo energético (LPWAN) para la transmisión inalámbrica de datos de sensores instalados en la red eléctrica. Estas tecnologías son clave para mejorar la gestión y supervisión de redes de distribución en contextos con recursos limitados para el diagnóstico de fallas y mejora del servicio (Donato et al., 2022)	El sistema identificará la pérdida del suministro eléctrico mediante un nodo sensor que captará la ausencia de tensión o corriente que será transmitido a un receptor mediante el empleo de tecnología LoRa.	Hardware	Condición física del Hardware.	Escalas de estimación
			Software embebido	Estructura del código embebido	Escalas de estimación
			Comunicación por radio frecuencia	Estabilidad de conexión Alcance de la señal(m)	Diario de campo
Variable Dependiente: Detección de interrupciones en redes de distribución eléctrica.	Es intervalo de tiempo que transcurre desde que ocurre una anomalía o interrupción en la red eléctrica hasta que dicha condición es detectada y reportada por el sistema de monitoreo.(Kim et al., 2024)	La detección será evidenciada cuando el nodo sensor percibe la ausencia de corriente o tensión interpretando como interrupción del servicio eléctrico y enviará una señal al receptor que medirá la intensidad de la señal y la cantidad de paquetes recibidos.	Calidad de la detección (RSSI)	Intensidad de la señal recibida (dBm)	Diario de campo
			Precisión en la Detección	Tasa de detección correcta (%) Número de falsos positivos (%)	Diario de campo

Fuente: Elaboración propia

3.2.9. Técnicas e Instrumentos De Recolección De Datos

- **Técnicas:** Observación directa de la funcionabilidad del sistema.
- **Instrumentos de recolección:** Escala de estimación.

3.2.10. Métodos De Análisis De Datos

Comparación directa de los datos obtenidos en cada escenario con ayuda de Hojas de cálculo (Excel).

3.2.11. Procedimiento

La presente investigación se desarrollará siguiendo seis fases que permitirán abordar de manera estructurada desde el diseño hasta la simulación del sistema de monitoreo.

Fase 1: Revisión bibliográfica

Se recopilará fuentes teóricas y estudios científicos previos relacionados a sistemas de monitoreo, redes de distribución eléctrica y tecnología LoRa, esto permitirá establecer y comprender las bases conceptuales de la investigación e identificar criterios técnicos relevantes para la elaboración del sistema.

Fase 2: Conceptualización

A partir del marco teórico con los objetivos planteados se definirá el funcionamiento del sistema de monitoreo siguiendo el enfoque de la investigación, se seleccionará componentes adecuados y su comunicación para el entorno del monitoreo, se elaborará un diseño y establecerá requerimientos técnicos y funcionales.

Fase 3: Elaboración del algoritmo y código fuente

Se elaborará un algoritmo adecuado en cada dispositivo para el funcionamiento del sistema. El código fuente se escribirá considerando las características del microcontrolador, integrando funciones de lectura de sensores, procesamiento de datos y transmisión mediante LoRa.

Fase 4: Prueba de módulos

Cada componente será evaluado de manera individual para verificar su correcto funcionamiento en base al algoritmo. Se realizarán pruebas por separado al hardware

y al sistema de comunicación, permitiendo identificar y corregir posibles errores antes de su integración.

Fase 5: Ensamble y prueba de sistema

Luego de la validación de los componentes se procederá a ensamblar los dispositivos del sistema y se establecerá la comunicación de los dispositivos para luego realizar pruebas generales y comprobar su comportamiento funcional.

Fase 6: Simulación de operación del sistema

Se ejecutará el sistema en su conjunto dentro de un entorno simulado. Esta fase permitirá observar su funcionamiento validando la interacción entre el receptor y emisor y comprobar que cumple con el objetivo establecido.

3.2.12. Aspectos Éticos

La presente investigación verificará que la información recolectada sean fuentes confiables y que la información presentada sea verídica.

3.2.13. Descripción de componentes

3.2.13.1. Arduino NANO

Arduino NANO es una tarjeta de desarrollo quien basa su funcionamiento en un microcontrolador de 8 bits llamado ATmega328 quien cuenta con 14 pines de señal digital que puede funcionar como salida o entrada, y 08 pines de entrada analógica y 06 de salida analógica. Arduino NANO es una tarjeta de bajo costo y tamaño reducido que lo hacen adecuado para su uso. Para la comunicación se utilizó la comunicación serial I2C (*Inter-Integrated Circuit*). (Heredia Rivadeneria & Lucero Andrade, 2021)

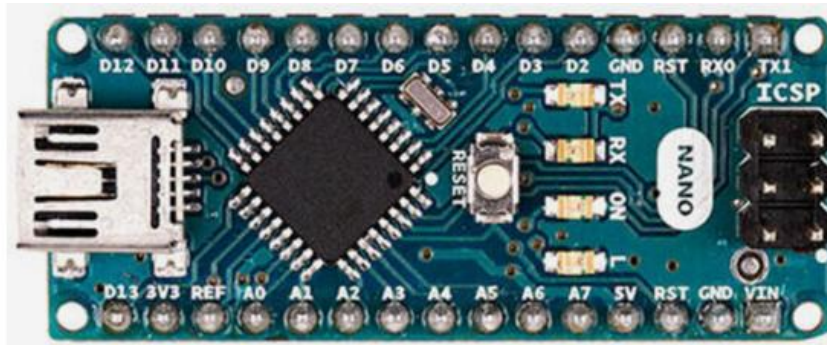


Figura 7. Arduino NANO. (Heredia Rivadeneria & Lucero Andrade, 2021)

3.2.13.2. LoRa SX1278 433MHz

Es el dispositivo a utilizar en la capa física, la cual emplea el chip SX1278 que opera en la banda de 433MHz, estos se usarán en los nodos que se emplearán para la comunicación entre en dispositivo transmisor como con el receptor.(Cabrera Rojas & Laura Condori, 2024)

3.2.13.3. Sensor de voltaje ZMPT101B

Este es un sensor tipo módulo, diseñado para medir voltajes en AC desde 0 V hasta 250 V y convertirlas en señales analógicas de 0 a 5 V que pueden ser medidas por el Arduino NANO, dado que se requiere medidor tensiones en AC donde la tensión nominal en domicilios en Perú es de 220V el módulo ZMPT101B resuelve el problema.(Cabrera Rojas & Laura Condori, 2024)



Figura 8. Sensor de voltaje ZMPT101B. (Cabrera Rojas & Laura Condori, 2024)

3.2.13.4. Display Alfanumérico LCD LC1622 con módulo

Es un display diseñado para aplicaciones en embebidas e industriales, cuenta con interfases de pines doble para una buena integración, requiere una alimentación de 5.0 V pero regulable desde 2.0V hasta los 8.0V, el rango de operación optima de la temperatura es de entre -20 °C hasta los 70°C. (Winstar, n.d.)



Figura 9. Display Alfanumérico LCD LC1622. (Winstar, n.d.)

3.2.13.5. Modulo I2C PCF8574

El Módulo I2C PCF8574 es un pequeño adaptador electrónico que se usa principalmente para controlar dispositivos como el LCD usando el protocolo I2C, reduciendo la cantidad de pines necesarios en un microcontrolador como Arduino. (Hanako, 2021)

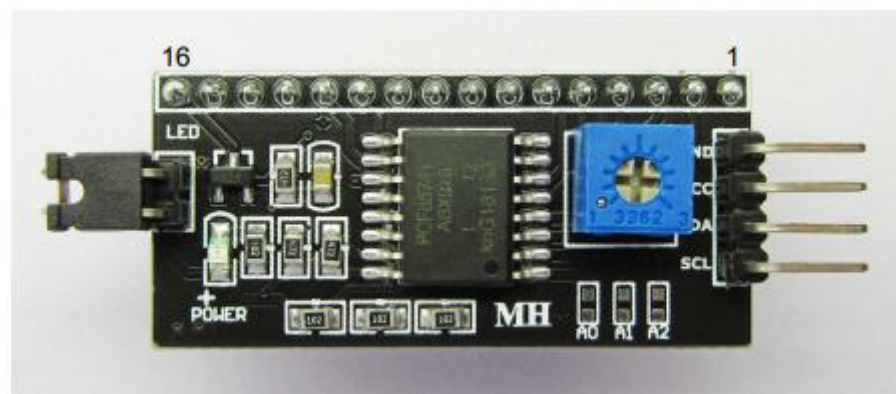


Figura 10. Modulo I2C PCF8574. (Hanako, 2021)

3.2.14. Descripción de la metodología de medición

El equipo transmisor se conectará a la red pública y realizará una medición de tensión cada 1 segundo mediante el sensor ZMPT101B la cual enviará los datos al dispositivo receptor y este mostrará los datos en tiempo real y lo almacenará en una memoria SD.

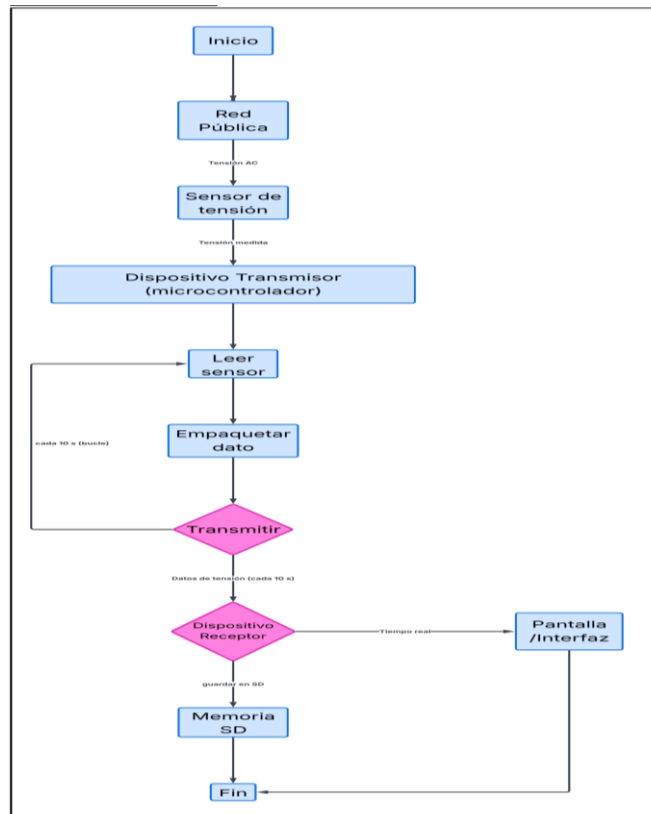


Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Conceptualización del dispositivo

Este sistema está conformado por dos unidades principales: un equipo transmisor y un equipo receptor. El equipo transmisor tiene la función de medir continuamente la tensión eléctrica en un punto específico de la red mediante un sensor de voltaje, identificando la presencia o ausencia del suministro eléctrico. Esta información es procesada por un microcontrolador y transmitida a través de un módulo de comunicación basado en tecnología LoRa.

Por su parte, el equipo receptor se encarga de recibir los datos enviados por el transmisor, interpretarlos y presentarlos al usuario mediante una interfaz visual, además de almacenarlos para su posterior análisis. Este proceso permite contar con información en tiempo real sobre el estado del suministro eléctrico, facilitando la detección oportuna de interrupciones.

El general, el dispositivo integra tres subsistemas fundamentales: el subsistema de adquisición de datos, el subsistema de procesamiento y control y el subsistema de comunicación inalámbrica.

4.2. Implementación de componentes

La implementación de los componentes del sistema se realizó considerando los requerimientos, para el procesamiento, transmisión, recepción y visualización de datos relacionados con el estado del suministro eléctrico.

Para el equipo transmisor, se empleó el sensor de voltaje ZMPT101B, el cual fue implementado para medir la tensión en corriente alterna de la red eléctrica que puede medir hasta un máximo de 250VAC RMS. Este sensor permite convertir la señal de voltaje en una señal analógica proporcional, la cual es leída por el microcontrolador Arduino NANO

mediante su entrada analógica A0. Para el procesamiento y control del sistema, se utilizó el microcontrolador Arduino Nano, seleccionado por su tamaño compacto, bajo costo y capacidad suficiente para gestionar las tareas de lectura, procesamiento de datos y comunicación. Este componente actúa como el cerebro del sistema tanto en el módulo transmisor como en el receptor. En el subsistema de comunicación, se implementó el módulo LoRa SX1278, el cual permite la transmisión inalámbrica de datos a larga distancia, el conexionado de módulos se empleó el diagrama de la figura 12 para el equipo transmisor.

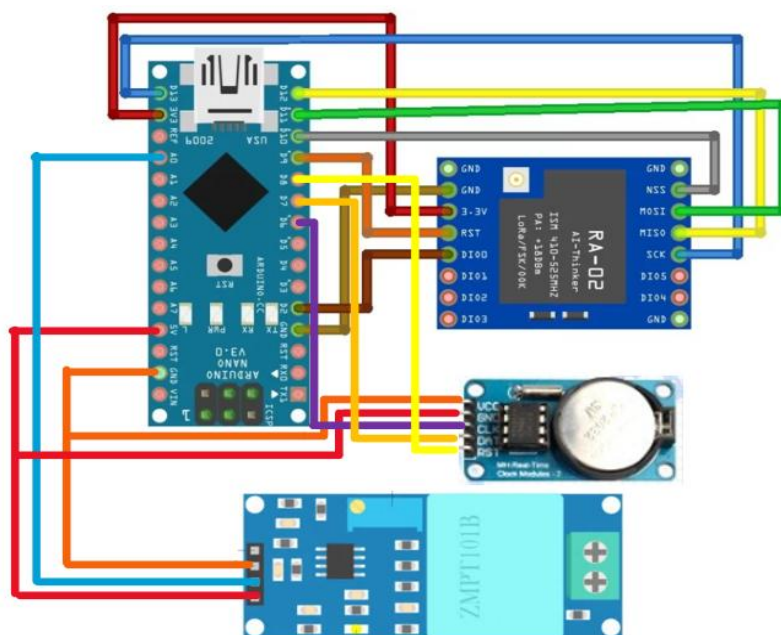


Figura 13. Diagrama de conexión del dispositivo transmisor.

Se usó una placa perforada donde se conectó cada pin mediante soldadura con estaño para asegurar la conexión entre componente y evitar error de comunicación entre ellos, para una fuente de alimentación se empleó un compartimiento de 03 pilas doble A de 1.5 V con una capacidad de 3500mAh conectadas en serie para dar un voltaje resultante de 4.5V, la tensión necesaria para el funcionamiento del equipo.

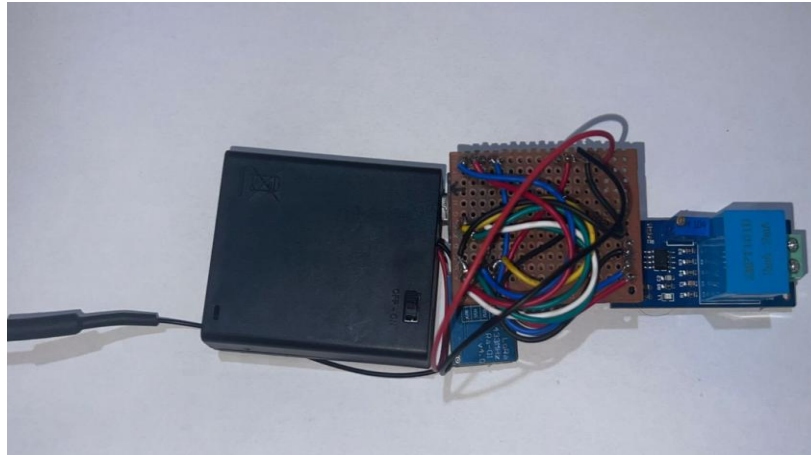


Figura 14. Implementación de componentes del equipo transmisor.

Para la visualización de la información en el equipo receptor, se integró un display alfanumérico LCD LC1622, complementado con un módulo I2C PCF8574, lo que permitió simplificar el cableado y optimizar el uso de pines del microcontrolador. Este componente facilita la presentación en tiempo real de los datos recibidos. Asimismo, se implementó un módulo de almacenamiento basado en memoria microSD, el cual permite registrar los datos transmitidos, incluyendo valores de tensión y estados del sistema, para el análisis posterior. La conexión de todos los módulos se realizó de acuerdo con la figura 14.

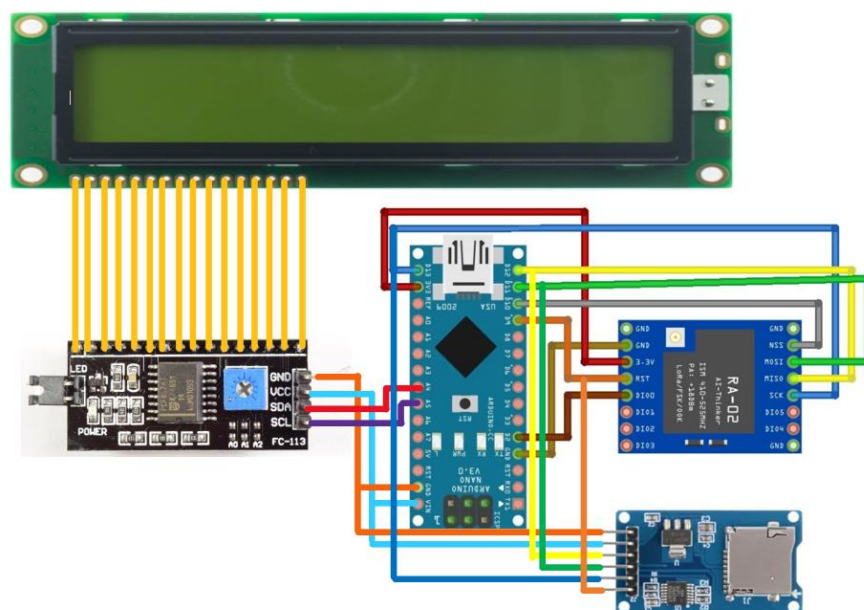


Figura 15. Diagrama de conexión del dispositivo receptor.

De la misma manera como se realizó con el equipo transmisor, se utilizó una placa perforada para conectar cada componente del equipo soldando los pines con estaño para una mejor conexión, para la alimentación se empleó 03 pilas doble A de 1.5V y con una capacidad de almacenamiento de 3500 mAh con un voltaje de alimentación resultante de 4.5V.

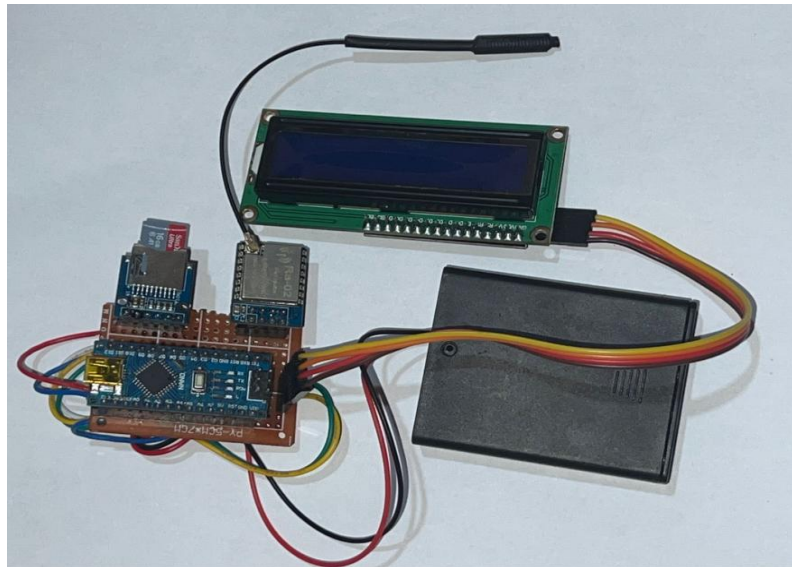


Figura 16. Implementación de componentes del equipo receptor.

4.3. Configuración del receptor

La configuración del receptor se realizó mediante pruebas de cada componente, en primer lugar, se estableció la conexión del módulo LoRa SX1278 al microcontrolador Arduino Nano mediante comunicación SPI, configurando los pines correspondientes (MISO, MOSI, SCK y NSS) como indica la relación de la 5.

Tabla 5. Relación en entradas y salidas entre el LoRa y el Arduino Nano en el receptor.

LoRa RA-02	Arduino Nano
NSS	D10
MOSI	D11
MISO	D12
SCK	D13

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se inicializó el módulo LoRa definiendo la frecuencia de operación (433 MHz) con el fin de asegurar una comunicación estable.

Para la visualización de los datos, se integró un display alfanumérico LCD LC1622 utilizando un módulo I2C PCF8574, lo que permitió reducir el número de pines utilizados. El display fue configurado para mostrar en tiempo real el estado de la red eléctrica (presencia o ausencia de tensión) y los valores recibidos desde el transmisor.

Tabla 6. Relación en entradas y salidas entre el display LCD y el Arduino Nano

LCD I2C	Arduino Nano
GND	GND
VCC	5V
SDA	A4
SCL	A5

Fuente: Elaboración propia

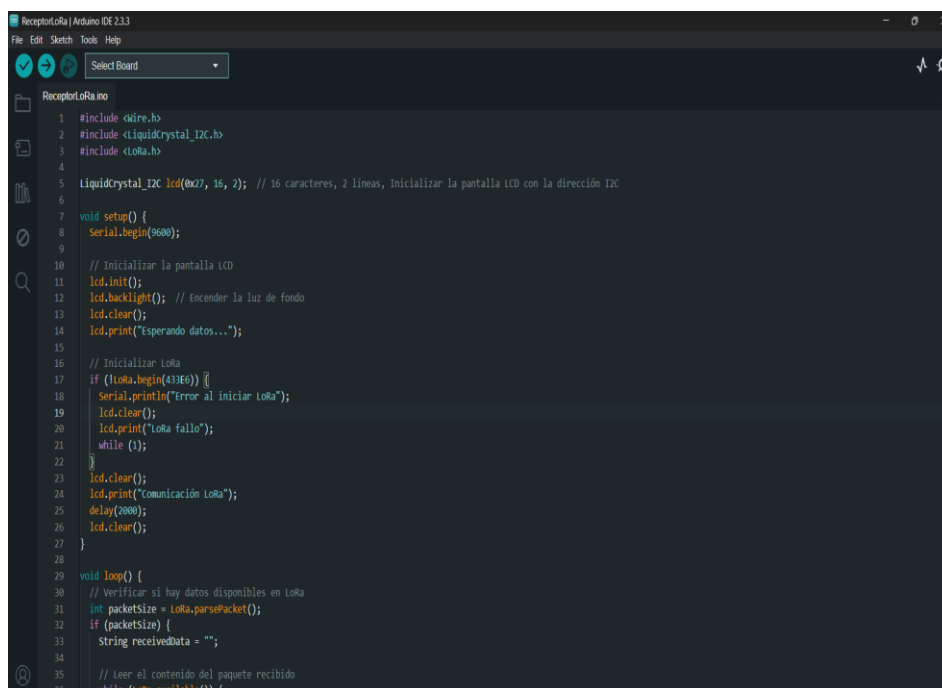
Adicionalmente, se incorporó un módulo de almacenamiento (memoria SD), el cual fue configurado para registrar los datos recibidos, incluyendo el estado de la señal y los valores de tensión, esto permite contar con un historial de datos para su posterior análisis.

Tabla 7. Relación en entradas y salidas entre el módulo del Micro SD y el Arduino NANO

Módulo Micro SD	Arduino Nano
VCC	5V
GND	GND
MOSI	D11
MISO	D12
SCK	D13
CS	D4

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se desarrolló e implementó el software embebido encargado de la recepción continua de datos, validación de la información y actualización de la interfaz de visualización, garantizando así el funcionamiento autónomo del sistema receptor.



```

ReceptorLoRa | Arduino IDE 2.3.3
File Edit Sketch Tools Help
Select Board

ReceptorLoRa.ino
1 #include <Wire.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3 #include <LoRa.h>
4
5 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // 16 caracteres, 2 lineas, Inicializar la pantalla i2c con la dirección I2C
6
7 void setup() {
8   Serial.begin(9600);
9
10  // Inicializar la pantalla i2c
11  lcd.init();
12  lcd.backlight(); // Encender la luz de fondo
13  lcd.clear();
14  lcd.print("Esperando datos...");
15
16  // Inicializar LoRa
17  if (!LoRa.begin(433E6)) {
18    Serial.println("Error al iniciar LoRa");
19    lcd.clear();
20    lcd.print("LoRa fallo");
21    while (1);
22  }
23  lcd.clear();
24  lcd.print("Comunicación LoRa");
25  delay(2000);
26  lcd.clear();
27 }
28
29 void loop() {
30   // verificar si hay datos disponibles en LoRa
31   int packetSize = LoRa.parsePacket();
32   if (packetSize) {
33     String receivedData = "";
34
35     // Leer el contenido del paquete recibido
36     while (LoRa.available()) {

```

Figura 17. Código del software embebido del equipo receptor.

4.4. Configuración del transmisor

La configuración del transmisor se orientó a la adquisición y envío periódico de datos de tensión eléctrica desde un punto de la red de pública. El equipo transmisor está basado en un microcontrolador Arduino Nano el cual interactúa con el sensor de voltaje ZMPT101B para la medición del nivel de tensión, la relación de conexión de entradas y salidas del Arduino Nano y el sensor de voltaje ZMPT101B fue de acuerdo con la Tabla 8.

Inicialmente, se realizó la conexión del sensor de voltaje al microcontrolador mediante una entrada analógica, permitiendo la lectura de señales proporcionales al valor de tensión de la red. Se calibró el sensor para obtener mediciones adecuadas dentro del rango de operación hasta 250 VAC RMS, asegurando precisión en la detección de la presencia o ausencia de suministro eléctrico.

Tabla 8. Relación en entradas y salidas entre el sensor ZMPT101B y el Arduino NANO

ZMPT101B	Arduino Nano
VCC	5V
GND	GND
OUT	A0

Fuente: Elaboración propia

El módulo LoRa SX1278 para la transmisión de datos se configuró la comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) con el microcontrolador Arduino Nano. Se establecieron parámetros como la frecuencia de operación en 433 MHz para la estabilidad del enlace inalámbrico, el conexionado entre el módulo LoRa y el Arduino Nano fue realizada de acuerdo a la Tabla 9.

Tabla 9. Relación en entradas y salidas entre el módulo del Micro SD y el Arduino NANO.

LoRa	Arduino
MOSI	D11
MISO	D12
SCK	D13
NSS	D10
RST	D9
DIO0	D2
GND	GND
3V	3V

Fuente: Elaboración propia

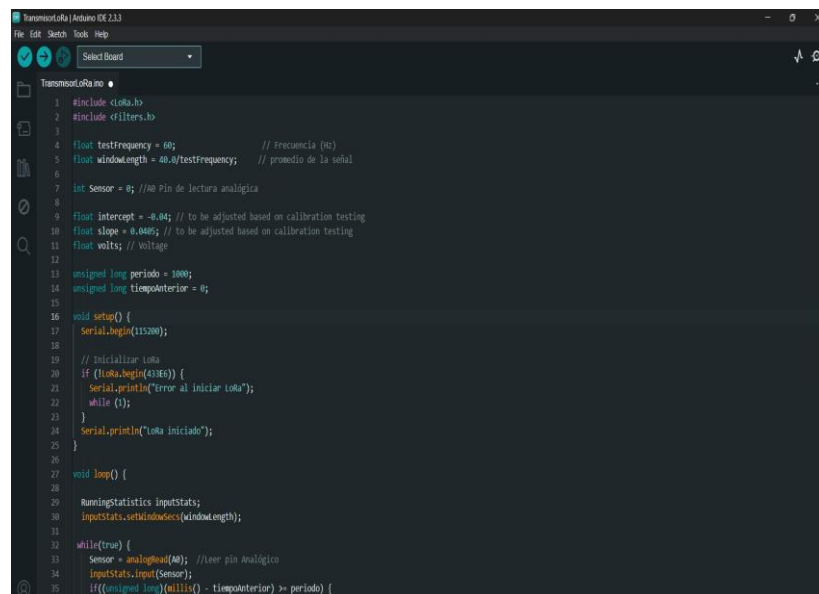
El módulo RTC DS1302 se comunica con el Arduino Nano mediante una interfaz serial de tres hilos (ThreeWire), la cual utiliza las líneas DAT (datos), CLK (reloj) y RST (reset/habilitación). En la conexión implementada, el pin D7 del Arduino se utiliza como línea de datos bidireccional (DAT), el pin D6 proporciona la señal de reloj (CLK), y el pin D8 actúa como habilitación del dispositivo (RST). Esta configuración permite una comunicación síncrona donde el Arduino controla el flujo de datos hacia y desde el RTC.

Tabla 10. Relación en entradas y salidas entre el módulo RTC y el Arduino NANO.

Señal RTC	Pin Arduino	Tipo	Función
DAT	D7	Entrada/Salida	Datos bidireccionales
CLK	D6	Salida	Señal de reloj
RST	D8	Salida	Habilita comunicación

Fuente: Elaboración propia

El software embebido del transmisor fue programado para realizar lecturas de tensión en intervalos definidos (cada segundo), procesar la información y determinar el estado del suministro eléctrico. En caso de detectar ausencia de tensión, el sistema lo interpreta como una interrupción, de esta manera, el transmisor opera de forma autónoma, capturando información del entorno eléctrico y enviándola continuamente al sistema receptor, permitiendo el monitoreo remoto en tiempo real.



```

1 #include <Adafruit.h>
2 #include <Adafruit_BusIO.h>
3
4 float testfrequency = 100; // frecuencia (Hz)
5 float windowlength = 40.0/testfrequency; // promedio de la señal
6
7 int Sensor = 0; //No Pin de lectura analógica
8
9 float intercept = -0.04; // to be adjusted based on calibration testing
10 float slope = 0.0005; // to be adjusted based on calibration testing
11 float volts; // Voltage
12
13 unsigned long periodo = 1000;
14 unsigned long tiempoanterior = 0;
15
16 void setup() {
17   Serial.begin(115200);
18
19   // Inicializar I2C
20   if (!I2C.begin(43)) {
21     Serial.println("Error al iniciar I2C");
22     while (1);
23   }
24   Serial.println("I2C iniciado");
25 }
26
27 void loop() {
28   RunningStatistics inputStats;
29   inputStats.setWindowSecs(windowlength);
30
31   while(true) {
32     Sensor = analogRead(A0); //Leer pin Analógico
33     inputStats.input(Sensor);
34     if((unsigned long)(millis() - tiempoanterior) >= periodo) {

```

Figura 18. Código del software embebido del equipo receptor.

4.5. Lógica de Programación del equipo transmisor

El programa embebido en el microcontrolador tiene como objetivo principal adquirir la señal analógica del sensor de tensión, procesarla mediante filtros estadísticos para obtener un valor eficaz (RMS) aproximado, y transmitir el estado de la red eléctrica a través del protocolo de radiofrecuencia LoRa. A continuación, se detalla la estructura y funcionamiento del código implementado.

4.5.1. Configuración Inicial del Sistema

En esta primera sección se incluyeron las dependencias necesarias para gestionar el transceptor de radiofrecuencia y para aplicar el procesamiento digital a la señal de entrada. Se definen los parámetros de la red eléctrica peruana, estableciendo la frecuencia base en 60 Hz y calculando una ventana de muestreo que permite promediar la señal adecuadamente. Posteriormente, se declaran los factores de calibración lineal matemática *intercept* y *slope* necesarios para convertir los valores estadísticos brutos leídos en el pin analógico A0 a magnitudes de tensión real en voltios. Finalmente, se establecen las variables *periodo* y *tiempoAnterior* empleadas para implementar un temporizador de muestreo no bloqueante, permitiendo que el sistema realice tareas concurrentes sin detener su ejecución.

```
#include <LoRa.h>
#include <Filters.h>

float testFrequency = 60;           // Frecuencia (Hz)
float windowLength = 40.0/testFrequency; // promedio de la señal

int Sensor = 0; //A0 Pin de lectura analógica

float intercept = -0.04; // to be adjusted based on calibration testing
float slope = 0.0405; // to be adjusted based on calibration testing
float volts; // Voltage

unsigned long periodo = 1000;
unsigned long tiempoAnterior = 0;
```

4.5.2. Recolección y procesamiento de datos del equipo transmisor

Dentro del ciclo principal de ejecución, se crea una instancia del objeto *RunningStatistics* que actúa como un filtro digital. A este filtro se le asigna la ventana de tiempo calculada previamente. A través de un ciclo continuo *while(true)*, el microcontrolador realiza lecturas del puerto analógico A0 y alimenta dichos datos al objeto. Utilizando la función *millis()*, el sistema evalúa si ha transcurrido el tiempo definido (1 segundo). Una vez cumplido este periodo, el sistema extrae las muestras recolectadas mediante la función *inputStats.sigma()*, valor que es directamente proporcional a la magnitud RMS de la señal alterna. Este valor crudo es ajustado por la ecuación de la recta de calibración y multiplicado por un factor de corrección (64) para obtener la tensión final en voltios.

```
void loop() {

    RunningStatistics inputStats;
    inputStats.setWindowSecs(windowLength);

    while(true) {
        Sensor = analogRead(A0); //Leer pin Analógico
        inputStats.input(Sensor);
        if((unsigned long)(millis() - tiempoAnterior) >= periodo) {
            volts = intercept + slope * inputStats.sigma(); //offset y amplitud
            volts = volts*(64);                               //calibración
            tiempoAnterior = millis();
        }
    }
}
```

4.5.3. Lógica de decisión y transmisión de alertas

Una vez calculado el voltaje, el software evalúa el estado de la línea mediante una estructura condicional, definiendo un umbral crítico de 150 V. Si la tensión supera este nivel, el sistema asume que la red está energizada correctamente, ensambla un paquete de datos LoRa (*beginPacket()*) que contiene la lectura actual y lo transmite (*endPacket()*). Si la tensión medida cae por debajo de los 150 V, el sistema detecta una interrupción del servicio eléctrico y transmite inmediatamente una alerta de estado "Sin energía" dado que una lectura

de tensión de 150V puede también comprenderse como una falla. En ambos escenarios, las lecturas también se envían al monitor serie para la validación local del prototipo.

```

    if (volts > 150) {
        // Enviar datos por LoRa
        LoRa.beginPacket();
        LoRa.print(F("Voltaje: "));
        LoRa.print(volts);
        LoRa.endPacket();

        Serial.print("Voltaje transmitido: ");
        Serial.println(volts);
    } else {
        // Enviar datos por LoRa
        LoRa.beginPacket();
        LoRa.print(F("Sin energia"));
        LoRa.endPacket();

        Serial.print("Desconectado transmitido: ");
        Serial.println(volts);
    }
}
}
}
delay(2000); // Enviar cada 2 segundos
}

```

4.6. Lógica de programación del equipo receptor y almacenamiento de datos

El software embebido en el equipo receptor tiene la responsabilidad de escuchar continuamente la red LoRa, decodificar los paquetes provenientes del nodo sensor, sincronizar la información con un reloj de tiempo real (RTC), visualizar el estado en una pantalla local y registrar todos los eventos en una memoria MicroSD para su posterior análisis estadístico.

4.6.1. Inclusión de librerías y definición de periféricos

En esta primera sección se incluyen las librerías necesarias para el manejo de los protocolos de comunicación por hardware con lo son *Wire.h* (I2C) para la pantalla LCD,

SD.h y *LoRa.h* (SPI) para el almacenamiento y la radiofrecuencia, y *ThreeWire.h* para el reloj en tiempo real (RTC) *DS1302*. Se instancian los objetos correspondientes definiendo los pines de control, como el pin 4 para el selector de chip (CS) de la MicroSD y los pines 7, 6 y 8 para la comunicación con el módulo RTC. Asimismo, se declaran variables globales de control de tiempo, estableciendo una constante `LIMIT_TIME_MILLIS` de 2000 milisegundos (2 segundos), la cual servirá como umbral máximo de espera o *timeout* para detectar pérdidas de comunicación con el nodo transmisor.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <LoRa.h>
#include <SD.h>
#include <ThreeWire.h>
#include <RtcDS1302.h>

// Inicializar la pantalla LCD con la dirección I2C (0x27)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // 16 caracteres, 2 líneas
#define SD_CS 4

// RTC DS1302 (DAT, CLK, RST)
ThreeWire myWire(7,6,8);
RtcDS1302<ThreeWire> Rtc(myWire);

bool data_received = false;
int waiting_time = 0;
int time_temp = 0;
const int LIMIT_TIME_MILLIS = 2000;
char datestring[26];
```

4.6.2. Inicialización y sincronización del sistema

La rutina de inicialización (setup) prepara todos los periféricos involucrados. Primero, se activa la pantalla LCD I2C para proporcionar retroalimentación visual al usuario en campo. Luego, se inicializa el módulo RTC DS1302; el algoritmo incorpora un mecanismo de seguridad que verifica si el reloj ha perdido su configuración de fecha y hora, en cuyo caso se sincroniza automáticamente con la fecha y hora de compilación del código (`__DATE__`, `__TIME__`). Posteriormente, se inicializan los módulos MicroSD y LoRa (a 433 MHz). Al igual que en el equipo transmisor, si alguno de estos módulos críticos falla, el sistema se detiene en un bucle infinito y notifica el error en la pantalla, evitando la ejecución de un registro de datos defectuoso.

```

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    // Inicializar la pantalla LCD
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.clear();
    lcd.print("Esperando datos...");

    // RTC
    Rtc.Begin();
    RtcDateTime compiled = RtcDateTime(__DATE__, __TIME__);

    if (!Rtc.IsDateTimeValid()) {
        Rtc.SetDateTime(compiled);
    }
    // (Validaciones adicionales del RTC omitidas para brevedad...)

    // Inicializar MicroSD
    if (!SD.begin(SD_CS)) {
        lcd.clear();
        lcd.print("SD Fallo");
        while (1);
    }

    // Inicializar LoRa
    if (!LoRa.begin(433E6)) {
        lcd.clear();
        lcd.print("LoRa fallo");
        while (1);
    }
}

```

4.6.3. Recepción y decodificación de datos

El ciclo principal inicia consultando la hora exacta al RTC. Luego, la función `LoRa.parsePacket()` evalúa si existe un paquete entrante en el buffer de radio. Si se detecta información, el sistema resetea el temporizador de control (`time_temp = millis()`), extrae los caracteres recibidos para formar una cadena de texto (String) y obtiene el nivel de intensidad de señal (RSSI). Para procesar la información, el algoritmo utiliza funciones de manipulación de cadenas (`indexOf` y `substring`). Si contiene la palabra "Voltaje", el sistema aísla el valor numérico y lo convierte a un dato entero. Por el contrario, si contiene la alerta "Sin energia", el sistema asigna automáticamente el valor de 0 V, traduciendo el mensaje a un formato numérico útil para el registro de datos.

```

void loop() {
    RtcDateTime now = Rtc.GetDateTime();
    printDateTime(now);

    // Verificar si hay datos disponibles en LoRa
    int packetSize = LoRa.parsePacket();
    if (packetSize) {
        time_temp = millis();
        String receivedData = "";

        // Leer el contenido del paquete recibido
        while (LoRa.available()) {
            receivedData += (char)LoRa.read();
        }
        int rssi = LoRa.packetRssi();

        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print(receivedData);

        int voltaje = -1;

        // Si viene "Voltaje: xxx"
        if (receivedData.indexOf("Voltaje") >= 0) {
            int pos = receivedData.indexOf(":");
            if (pos >= 0) {
                voltaje = receivedData.substring(pos + 1).toInt();
            }
        }
        // Si viene "Sin energia"
        else if (receivedData.indexOf("Sin energia") >= 0) {
            voltaje = 0;
        }
    }
}

```

4.6.4. Almacenamiento en memoria no volátil

Una vez decodificado el mensaje y capturado el RSSI, el software procede a la etapa de registro (Datalogging). Se abre el archivo datos.txt alojado en la memoria MicroSD en modo escritura. El sistema concatena y guarda una línea estructurada con el siguiente formato: fecha/hora, nivel de tensión y calidad de señal LoRa (RSSI). Finalmente, se cierra el archivo para garantizar que los datos se guarden físicamente en la memoria, previniendo la corrupción del archivo en caso de una desconexión abrupta de la alimentación.

```
// Guardar en TXT
File dataFile = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
  dataFile.print(datestring);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(voltaje);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.println(rssi);
  dataFile.close();
}
}
```

4.6.5. Gestión de fallos y pérdida de señal

Esta sección es crucial para evaluar la fiabilidad de la red inalámbrica. Si no se reciben paquetes, el algoritmo calcula el tiempo de espera transcurrido. Si este tiempo excede el umbral de tolerancia (LIMIT_TIME_MILLIS equivalente a 2 segundos), el sistema deduce que se ha perdido el enlace o que un paquete no llegó a su destino. En este escenario, el LCD muestra la alerta "SIN_SEÑAL" y el sistema registra en la memoria MicroSD la marca de tiempo actual acompañada de los valores -1 para el voltaje y 0 para el RSSI. Esta estrategia de manejo de excepciones permite contabilizar estadísticamente la tasa de paquetes perdidos durante las pruebas de campo y evaluar la calidad del servicio del enlace LoRa.

```
else {
  if(time_temp == 0) {
    time_temp = millis();
  }
  if (waiting_time >= LIMIT_TIME_MILLIS) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("SIN_SEÑAL");

    File dataFile = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
      dataFile.print(datestring);
      dataFile.print(" -1 0"); // sin señal y RSSI 0
      dataFile.println();
      dataFile.close();
    }
    delay(1000);
    time_temp = millis() - (LIMIT_TIME_MILLIS-1000);
  }
  waiting_time = millis() - time_temp;
}
}
```

4.7. Validación del funcionamiento del dispositivo.

Se realizaron pruebas de funcionamiento del dispositivo con el propósito de verificar la correcta operación del sistema de monitoreo y transmisión de datos. Para ello, el equipo transmisor, basado en el Arduino Nano e integrado con el módulo Módulo LoRa SX1278 RA-02 y el sensor Sensor de voltaje ZMPT101B, fue conectado a un punto de suministro de energía eléctrica.

Durante las pruebas, se validó que el equipo transmisor realiza la adquisición de la señal de tensión eléctrica y transmite de manera inalámbrica hacia el equipo receptor la información correspondiente, incluyendo la fecha y hora de medición, el valor de tensión expresado en voltios (V) y un indicador de calidad del enlace de comunicación, representado por el parámetro RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), medido en dBm.

Asimismo, se verificó que el equipo receptor recibe correctamente los datos transmitidos, permitiendo su visualización y registro para su posterior análisis. La validación se consideró satisfactoria cuando la información recibida coincidió con las mediciones esperadas y se mantuvo una comunicación estable entre ambos equipos.

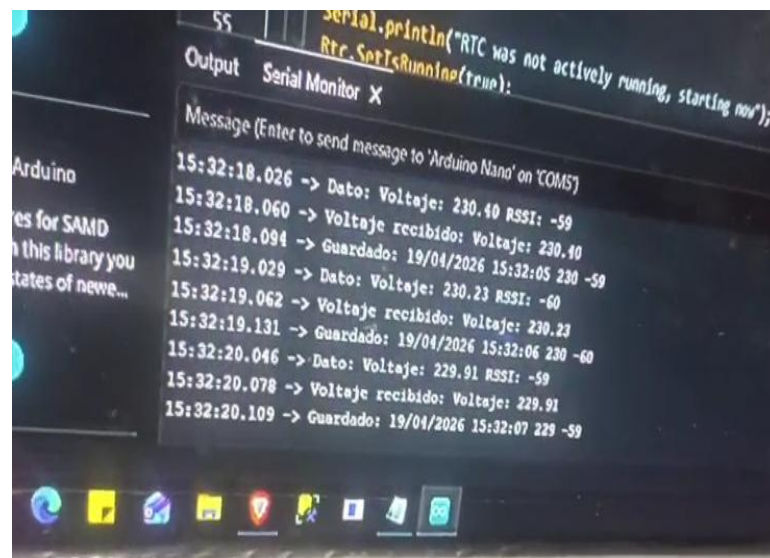


Figura 19. Serial monitor mostrando datos del tomados por el equipo transmisor

El indicador RSSI permite evaluar la potencia de la señal recibida en el sistema LoRa. Valores cercanos a 0 dBm representan señales fuertes, mientras que valores por debajo de -105 dBm indican condiciones de señal débil.

4.7.1. Pruebas del dispositivo

El dispositivo fue diseñado para la toma de parámetros de tensión en un punto de entrega y comunicarlo mediante un módulo LoRA SX1278 que es usado para transmitir mensajes de largo alcance, para medir el nivel de tensión se empleó el sensor ZMPT101B para la medición de voltaje en corriente alterna, el cual opera mediante un principio de medición indirecta. Este módulo incorpora un transformador de precisión que reduce el nivel de tensión de entrada una señal de baja amplitud proporcional, posteriormente, la señal reducida es acondicionada mediante un circuito basado en un amplificador operacional, generando una señal analógica senoidal dentro del rango de 0 a 5 V. Esta señal es adecuada para ser procesada por un microcontrolador a través de su convertidor analógico-digital (ADC).

Cabe destacar que el sensor no entrega directamente el valor eficaz (RMS) del voltaje, por lo que es necesario realizar un procesamiento digital posterior para obtener dicho parámetro a partir de la señal muestreada, además para que el dispositivo de monitoreo entregue datos más cercanos al real se realizó un ajuste comparando los valores de nivel de tensión detectada con una pinza amperimétrica certificada a fin de entregar datos más confiables.



Figura 20. Comparación de la medición de tensión del dispositivo .

4.7.2. Análisis del Comportamiento de la Señal LoRa (RSSI) frente a la Distancia

Para la evaluación de la calidad del enlace, se tomó como referencia la escala de intensidad de señal para tecnología LoRaWAN, donde valores superiores a -90 dBm se consideran aceptables para telemetría, mientras que valores inferiores a -105 dBm representan el umbral operativo del dispositivo lo que indicaría una señal débil.

Tabla 11. Escalas de Calidad de Señal LoRa.

Rango de RSSI (dBm)	Calidad de Señal	Interpretación
Mayor a -90 dBm	Buena	Rango óptimo de operación. Ideal para entornos urbanos con algunos obstáculos. Señal típica en largas distancias o con paredes de por medio. El sistema funciona bien, aunque puede haber reintentos de envío.
-90 a -105 dBm	Media	

Menor a -150 dBm

Débil

La señal está llegando al límite. Puede haber pérdida de datos.

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar la viabilidad del sistema de monitoreo, se realizaron pruebas de campo registrando el nivel de intensidad de la señal recibida RSSI medido en dBm en intervalos regulares de distancia, desde los 20 metros hasta los 240 metros.



Figura 21. Medición de la señal del dispositivo hasta los 20 primeros metros

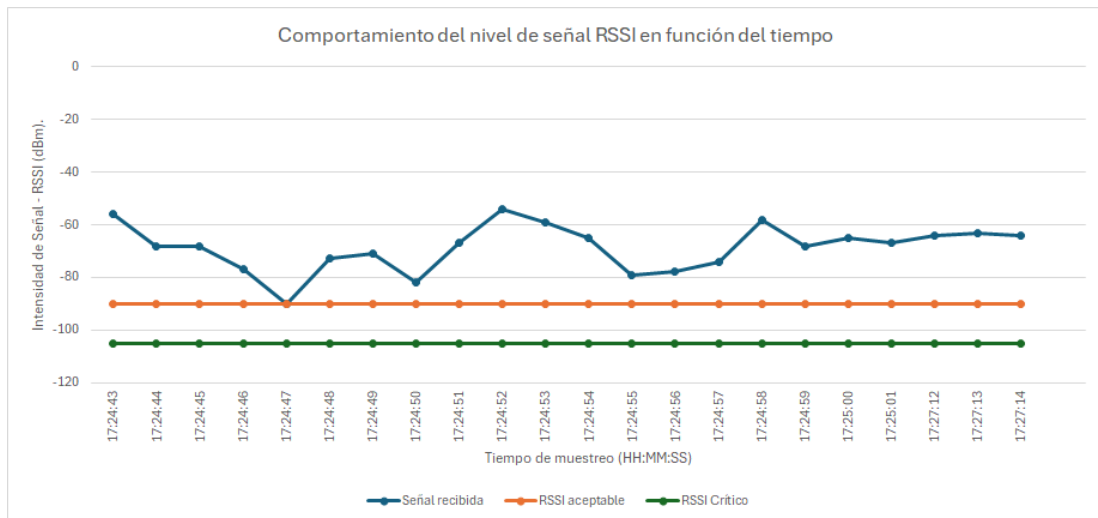


Figura 22. Comportamiento del nivel de señal RSSI durante los 20 primeros metros.

Los datos obtenidos demuestran una correlación inversamente proporcional entre la distancia y la calidad de la señal. En distancias cortas desde los 20 m y 40 m, el sistema registró valores de RSSI promedios de -68 dBm, con picos de excelente recepción de hasta -54 dBm, lo que garantiza una comunicación óptima.

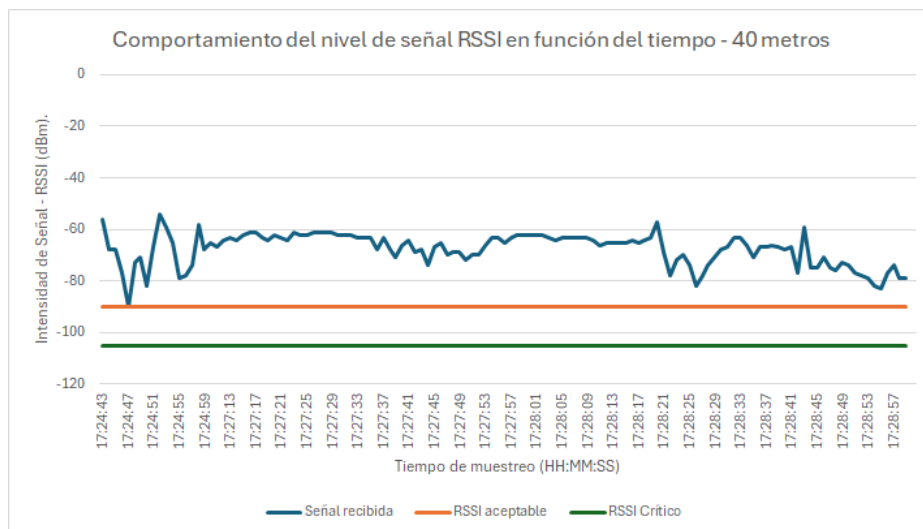


Figura 23. Comportamiento del nivel de señal RSSI hasta los 40 metros.

A medida que el nodo sensor se alejó del receptor, se observó una atenuación progresiva de la señal. A partir de los 140 metros, el RSSI decayó a niveles críticos cercanos a los -108 dBm y -110 dBm.

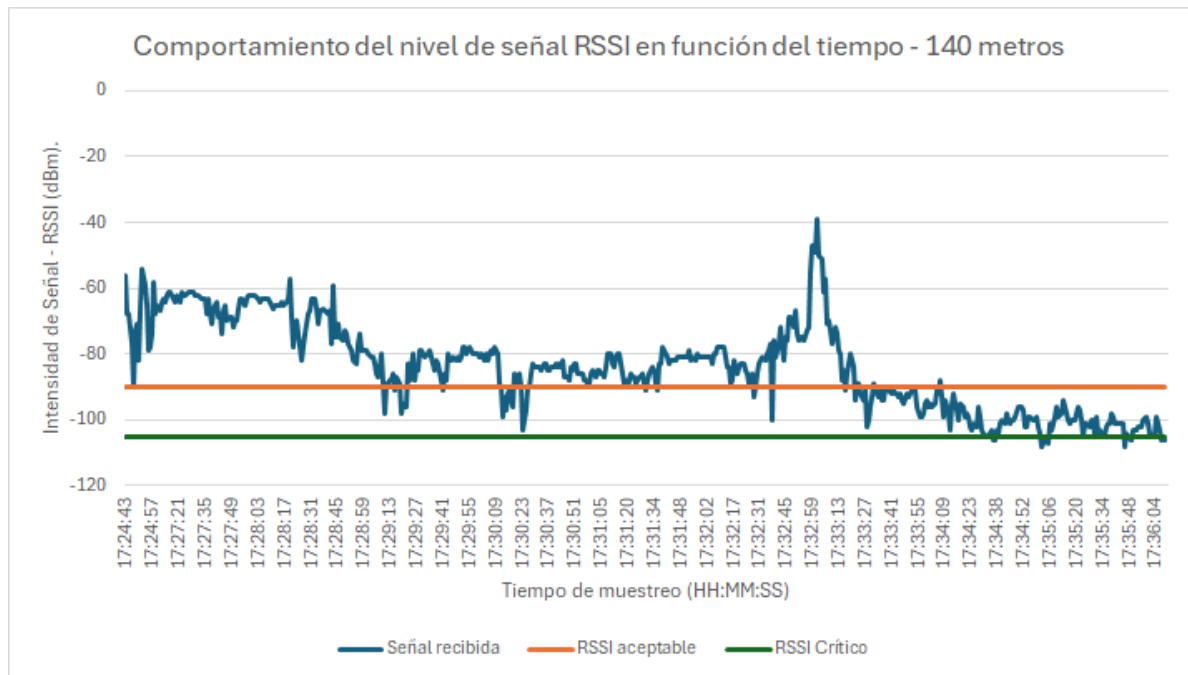


Figura 24. Comportamiento del nivel de señal RSSI hasta los 140 metros.

Cabe destacar una anomalía registrada a los 80 metros de distancia, donde el sistema documentó una mejora atípica de la señal con picos de -39 dBm a -47 dBm este fenómeno puede atribuirse a variables del entorno físico, como la existencia de una línea de vista directa temporal, reflexiones constructivas de la onda electromagnética o una alineación óptima momentánea de las antenas lo que conllevó a una mejora momentánea de la señal recibida.

4.7.3. Fiabilidad de Transmisión y Tasa de Pérdida de Paquetes

La robustez del protocolo LoRa para esta aplicación específica se midió observando la continuidad y validez de las tramas de datos recibidas. Durante las pruebas, los valores de tensión registrados como "-1" significan una pérdida de señal entre el equipo receptor y el equipo transmisor, y los saltos temporales sin registro evidenciaron la pérdida de paquetes y fallas de comunicación.



Figura 25. Equipo receptor con perdida se señal del equipo transmisor

Los resultados indican que el sistema es altamente confiable en un rango operativo de hasta 120 metros, tramo en el cual la entrega de paquetes fue continua y sin pérdidas significativas.

Sin embargo, al superar el umbral de los 140 metros, el sistema comenzó a reportar valores nulos (-1), indicando colisiones o incapacidad de decodificación por baja intensidad de señal.

En las distancias de 220 m y 240 m, la tasa de pérdida de paquetes fue severa, estableciendo este rango como el límite operativo máximo para la configuración actual de hardware y antenas bajo las condiciones del escenario evaluado en la provincia de Leoncio Prado.

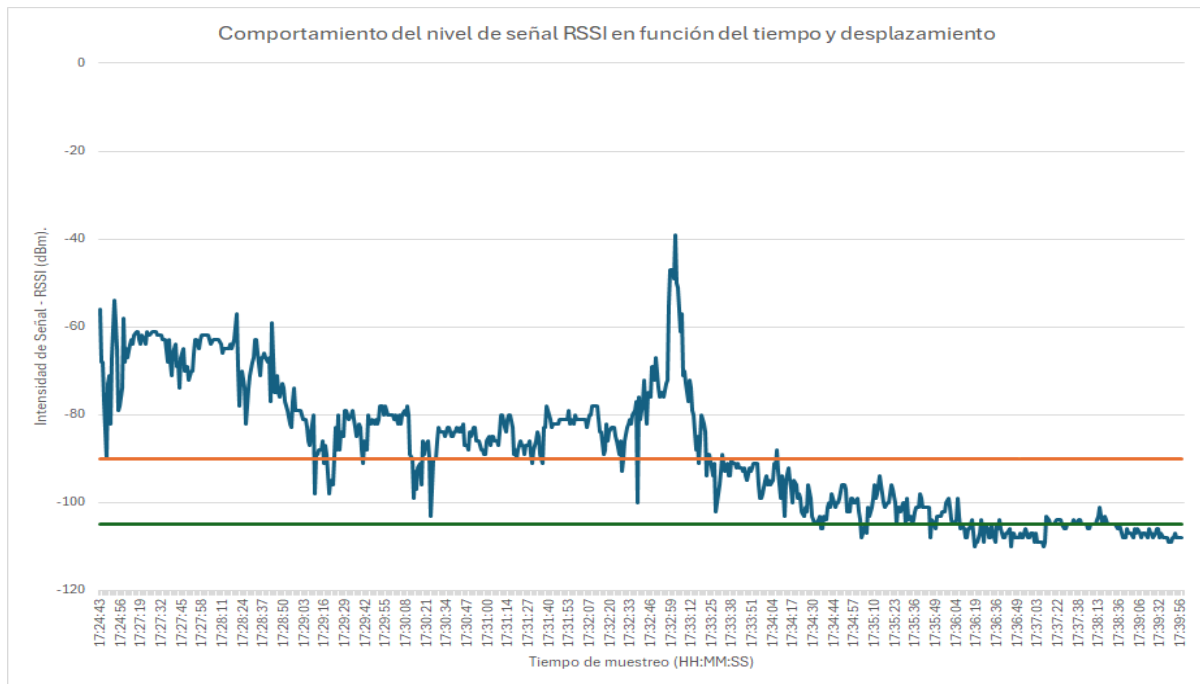


Figura 26. Nivel de señal RSSI en función del tiempo hasta los 240 metros.

4.7.4. Precisión en la Detección de Interrupciones Eléctricas

El objetivo central del prototipo es detectar caídas de tensión que simulan fallas en la red de distribución eléctrica. A lo largo del muestreo, la tensión nominal se mantuvo oscilando de manera realista en un rango operativo de 225 V a 236 V.

Las pruebas de interrupción cuando la tensión es igual a 0 V fueron capturadas y transmitidas exitosamente por el sistema de monitoreo en tiempo real. Se registraron cortes precisos, por ejemplo: a los 20 metros, a los 40 metros y a los 60 metros, el dispositivo demostró una excelente tasa de detección correcta, sin registrar "falsos positivos" de cortes de energía durante los periodos de estabilidad eléctrica, se validó la precisión del software embebido y los sensores de tensión utilizados.

Desde los 120 metro se comienza a perder datos debido a la distancia y la interferencia que existen entre ambos nodos, y en función la distancia incrementa las pérdidas de paquetes aumenta hasta un 66.67% a los 240 metros.

Tabla 12. Rendimiento del Sistema de Monitoreo LoRa

Distancia (m)	Tensión Promedio Operativa (V)	RSSI Promedio (dBm)	RSSI Mínimo (dBm)	RSSI Máximo (dBm)	Estabilidad de Enlace	Número de Paquetes Perdidos	Porcentaje de paquetes perdidos (%)
20	224.1	-68.6	-90	-54	Alta	0 pérdidas	0.00%
40	228.1	-66.2	-83	-57	Alta	0 pérdidas	0.00%
60	230.5	-85.1	-103	-78	Alta	0 pérdidas	0.00%
80	231.4	-85.6	-102	-39	Alta	0 pérdidas	0.00%
100	232.1	-100.8	-108	-94	Media	0 pérdidas	0.00%
120	231.8	-101.4	-105	-96	Media	0 pérdidas	0.00%
140	231.9	-104.2	-108	-99	Media	1 pérdida detectada	4.17%
160	232	-107.1	-110	-104	Débil	5 pérdidas detectadas	14.71%
180	232.2	-106.8	-110	-103	Débil	4 pérdidas detectadas	11.76%
200	231.5	-105.1	-106	-104	Débil	7 pérdidas detectadas	35.00%
220	232.2	-106.2	-108	-101	Débil	22 pérdidas detectadas	42.31%
240	234.6	-107.1	-109	-106	Límite Máximo	24 pérdidas detectadas	66.67%

Fuente: Elaboración propia

4.8. Discusiones

4.8.1. Rendimiento y alcance del enlace LoRa frente a las condiciones del entorno

Guillermo del Campo et al. (2018) señalan que el alcance teórico de la tecnología LoRa se ve mermado en áreas suburbanas o con obstáculos topográficos debido a la falta de línea de vista y a la absorción de la onda electromagnética. En el presente estudio

se confirma esta teoría para el caso particular de la geografía de Tingo María y sus sectores urbanos, tal como se evidencia en la Tabla 12 y en la figura 26. Los resultados demuestran que se mantiene una comunicación altamente fiable (0% de pérdida de paquetes y un RSSI promedio de -101.4 dBm) en un radio de hasta 120 metros; sin embargo, a partir de los 140 metros se observa un incremento progresivo en la pérdida de paquetes, llegando a un nivel crítico del 66.67% a los 240 metros. No obstante, este alcance verificado resulta suficiente para establecer topologías de red en malla o colocar gateways estratégicos en los postes de distribución urbana.

4.8.2. Precisión en la detección y eliminación de falsos positivos

Odongo et al. (2022) sostienen que el uso de hardware de bajo costo, sumado a un software embebido con un correcto filtrado estadístico, constituye una alternativa técnica y económicamente viable frente a los equipos industriales tradicionales para el monitoreo eléctrico, los dispositivos empleados evidencian en la figura 13 y figura 15. Los resultados demuestran que, durante la simulación de fallas, el prototipo desarrollado con microcontroladores Arduino y el sensor ZMPT101B logró registrar las caídas de tensión (0 V) de manera inmediata. Además, el sistema demostró un alto nivel de precisión al no reportar falsos positivos durante los rangos de operación eléctrica normal, los cuales oscilaron entre los 224 V y 236 V como se puede verificar en la figura 20.

4.8.3. Impacto en la gestión de la calidad del suministro (SAIDI / SAIFI)

Papuico Limaymanta (2025) y Chacon (2022) sostienen que las demoras en la detección de fallas internas en las redes de distribución eléctrica conllevan inevitablemente a una atención lenta y deficiente del servicio. Los resultados de las pruebas de transmisión en tiempo real validan que el prototipo cumple con su objetivo principal de notificar de forma remota y autónoma las interrupciones del servicio eléctrico como se evidencia en la Figura 25.

De este modo, la implementación del sistema LoRa propuesto demuestra ser una herramienta directa para reducir el tiempo de identificación de la falla en comparación con los reportes manuales.

V. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar con éxito un sistema de monitoreo de tensión basado en tecnología LoRa para redes de distribución eléctrica. El prototipo demostró ser una solución tecnológica viable, de bajo consumo y menor costo.

El diseño del hardware, compuesto por microcontroladores Arduino Nano, sensores de voltaje ZMPT101B y transceptores LoRa a 433 MHz, demostró un rendimiento óptimo de transmisión en distancias de hasta 120 metros, manteniendo una tasa de pérdida de paquetes del 0% y una estabilidad de enlace alta. Se determinó que, para la configuración de antenas utilizada y las barreras físicas del entorno, la fiabilidad decae progresivamente a partir de los 140 metros, marcando su límite operativo de diseño.

El software embebido desarrollado para el transmisor y receptor demostró una alta precisión. La aplicación de filtros para el valor eficaz de la tensión en la programación permitió discriminar correctamente los voltajes operativos normales de 224 V a 236 V de las interrupciones totales, eliminando la existencia de falsos positivos y garantizó el almacenamiento ordenado de los datos con marcas de tiempo.

La simulación de interrupciones eléctricas en pruebas de campo comprobó la hipótesis de la investigación que el sistema transmite alertas casi instantáneas ante caídas de tensión. La adopción a gran escala de esta tecnología permitirá a las empresas concesionarias reducir los tiempos de respuesta ante interrupciones intempestivas.

VI. RECOMENDACIONES

Dado que los resultados demostraron una atenuación crítica de la señal LoRa a partir de los 140 metros en zonas con obstáculos, se recomienda para futuras implementaciones sustituir las antenas estándar por antenas de mayor ganancia. Además, los nodos transmisores deben ser instalados en la parte más alta de los postes de distribución eléctrica para asegurar una mejor línea de vista para minimizar la absorción de la señal por la vegetación e infraestructura.

Para una aplicación a nivel de toda la ciudad o provincia, se sugiere evolucionar el sistema hacia una arquitectura LoRaWAN. Esto implicaría utilizar Gateways industriales que puedan recibir datos de cientos de nodos sensores distribuidos en múltiples líneas de baja tensión, creando una red de área amplia y robusta

El equipo receptor almacena los eventos en una memoria MicroSD de manera local. Se recomienda que en una siguiente fase de desarrollo, el módulo receptor se integre con un microprocesador con conectividad WiFi o Ethernet para migrar los datos a plataformas IoT en la nube.

VII. REFERENCIAS

- Arias Odón, F. G. (2012). *El proyecto de investigación*.
- Arias Odón Fideas Gerardo. (2012). *El proyecto de investigación*.
- Barón Martinez, E. M., & Torres Ortega, J. M. (2017). *Ampliación del sistema SCADA para telecontrol de subestaciones eléctricas en una planta del sector industrial*.
<https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/2754/0072915.pdf?sequence=1>
- Becerra Benavides, L. A. (2023). *Estrategia de detección e identificación de fallas eléctricas para sistemas de distribución eléctrica con generación distribuida basado en redes neuronales artificiales*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26451>
- Cabezas Ruiz Beltrán. (2025). *Desarrollo de mapas de cobertura Wi-Fi para el análisis de la red*. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/34981>
- Cabrera Rojas, A. R., & Laura Condori, P. (2024). *Diseño de un sistema de supervisión de alumbrado público, basado en los modelos de ciudad inteligente e internet de las cosas para la ciudad de Sicuani*. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8772>
- Chacon, K. G. (2022). *Análisis y propuesta de mejora de la calidad de suministro de energía eléctrica de la empresa de distribución Electronorte SA*.
<https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/10262>
- Chanchí-Golondrino, G.-E., Ospina-Alarcón, M.-A., Saba, M., Chanchí-Golondrino, G.-E., Ospina-Alarcón, M.-A., & Saba, M. (2022). Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista Científica*, 44(44), 257–271.
<https://doi.org/10.14483/23448350.18470>
- Corona Ramírez, L. G., Abarca Jiménez, G. S., & Mares Carreño, J. (2014). *Sensores Y Actuadores Introduccion* (Issue 2014).
https://books.google.com/books/about/Sensores_y_Actuadores.html?hl=es&id=wMm3BgAAQBAJ
- Cortez Calderón, J. E. (2017). *Análisis de localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución con generación distribuida*.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14362>
- Devalal, S., & Karthikeyan, A. (2018). LoRa Technology - An Overview. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2018*, 284–290. <https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474715>
- Donato, P. G., Hernández, Á., Funes, M., Carugati, I., Nieto, R., & Ureña, J. (2022). Revisión de aplicaciones de técnicas de monitoreo no intrusivo de cargas en redes eléctricas inteligentes. *Dialnet.Unirioja.Es*, 2344–9217.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8735080>

- Espinoza Montes, C. (2014). Metodología de Investigación Tecnológica Pensando en Sistemas. In *Universidad Nacional del Centro del Perú*. Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/1148>
- Gallardo, E. (2022). Protocolo de comunicación para la integración de dispositivos en los sistemas scada de las subestaciones eléctricas. *Télématique: Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, ISSN-e 1856-4194, Vol. 21, N°. 1, 2022, Págs. 59-82, 21(1), 59–82.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8578124&info=resumen&idioma=SPA>
- Guillermo del Campo, Gómez, I., Calatrava, S., & Martínez, R. (2018). Power Distribution Monitoring Using LoRa: Coverage Analysis in Suburban Areas. *Proceedings of the 2018 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*.
<https://dl.acm.org/doi/10.5555/3234847.3234903>
- Heredia Rivadeneria, A. E., & Lucero Andrade, P. F. (2021). *Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada*. Universidad de Cuenca.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/35875>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., María del Pilar Baptista Lucio, D., & Méndez Valencia Christian Paulina Mendoza Torres, S. (2014). *Metodología de la Investigación*.
- Hernández Vega José Isidro. (2010). El software embebido y los retos que implica su desarrollo. *ConCiencia Tecnológica*, ISSN-e 1405-5597, N°. 40 (Julio - Diciembre), 2010, Pág. 42, 40, 42.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3664739&info=resumen&idioma=SPA>
- Kaur, G., Balyan, V., & Gupta, S. H. (2024). Experimental analysis of low-duty cycle campus deployed IoT network using LoRa technology. *Results in Engineering*, 23, 102844.
<https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102844>
- Kim, D., Turlikov, A., Georgiev, G., & Dedova, T. (2024). LoRaWAN Optimization for Voltage Monitoring. *IEEE Access*, 12, 71866–71875.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3403257>
- Molina Moya, A. D. (2024). *Diseño e implementación de una red de área amplia de baja potencia (LPWAN), para el monitoreo y optimización del tiempo de registro de consumo, corte y reconexión del suministro eléctrico monofásico residencial*.
<http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13066>
- Mora, S. R. P., Jaramillo, F. A. B., & Caiza, D. A. C. (2024). Análisis de técnicas avanzadas de monitoreo y telemetría para gestión energética en transformadores de baja tensión. *Cotopaxi Tech*, 4(2), 142–156.
<https://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/154>
- Odongo, G. Y., Musabe, R., Hanyurwimfura, D., & Bakari, A. D. (2022). An Efficient LoRa-Enabled Smart Fault Detection and Monitoring Platform for the Power Distribution

- System Using Self-Powered IoT Devices. *IEEE Access*, 10, 73403–73420.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189002>
- OSINERGMIN. (2023). *Procedimiento para la calificación de solicitudes de exclusión de interrupciones del servicio eléctrico para el cálculo de compensaciones*.
<https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/4365907-124-2023-os-cd>
- Papuico Limaymanta, R. T. (2025). *Gestión de la calidad del suministro eléctrico en instalaciones de distribución de media tensión de los departamentos Moquegua y Tacna*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/6903>
- Proaño Guevara, S. I., Rengifo Santana, J. R., & ESPOL.FIEC. (2024). *Propuesta de Sistema de Telegestión para la Automatización de Alumbrado Público en Sistemas de Distribución Eléctrica*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/62702>
- Ronquillo Escobar Angeline Desire. (2022). *Diseño y simulación de un sistema de protección en celdas de media tensión con monitoreo Scada en Subestaciones eléctricas* [Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22501>
- Téllez Gutiérrez, S. M., Rosero García, J., Céspedes Gandarillas, R., Téllez Gutiérrez, S. M., Rosero García, J., & Céspedes Gandarillas, R. (2018). Sistemas de medición avanzada en Colombia: beneficios, retos y oportunidades. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(2), 469–488.
<https://doi.org/10.14482/INDE.36.2.10711>
- Torrente Artero, Ó. (2013). *Arduino Curso Práctico De Formación* (Primera Edición).
<https://elsolucionario.net/arduino-curso-practico-formacion-oscar-torrente-artero-1ra-edicion/>
- Tupac-Yupanqui, M., Vidal-Silva, C. L., Sánchez-Ortiz, A., & Pereira, F. (2021). Experiencias y beneficios del uso de Arduino en un curso de programación de primer año. *Formación Universitaria*, 14(6), 87–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062021000600087>
- Ulloa-Vásquez, F., Carrizo, D., García-Santander, L., Ulloa-Vásquez, F., Carrizo, D., & García-Santander, L. (2021). Alternativas de comunicación para redes de sensores AMI en Internet de las cosas para escenario energético en ciudades inteligentes. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(1), 158–167. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000100158>
- Verde Romero, D. A., Villalvazo Laureano, E., Jiménez Betancourt, R. O., & Navarro Álvarez, E. (2024). An open source IoT edge-computing system for monitoring energy consumption in buildings. *Results in Engineering*, 21, 101875.
<https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.101875>
- Zuñiga Huamani, A. A. (2025). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo en nube para los sistemas de alimentación ininterrumpida kaise de Tempel Perú*.
<https://repositorio.untels.edu.pe/handle/20.500.14717/1436>

ANEXOS

ANEXO A: DIAGRAMA ELECTRONICO DEL EQUIPO RECEPTOR Y RECEPTOR

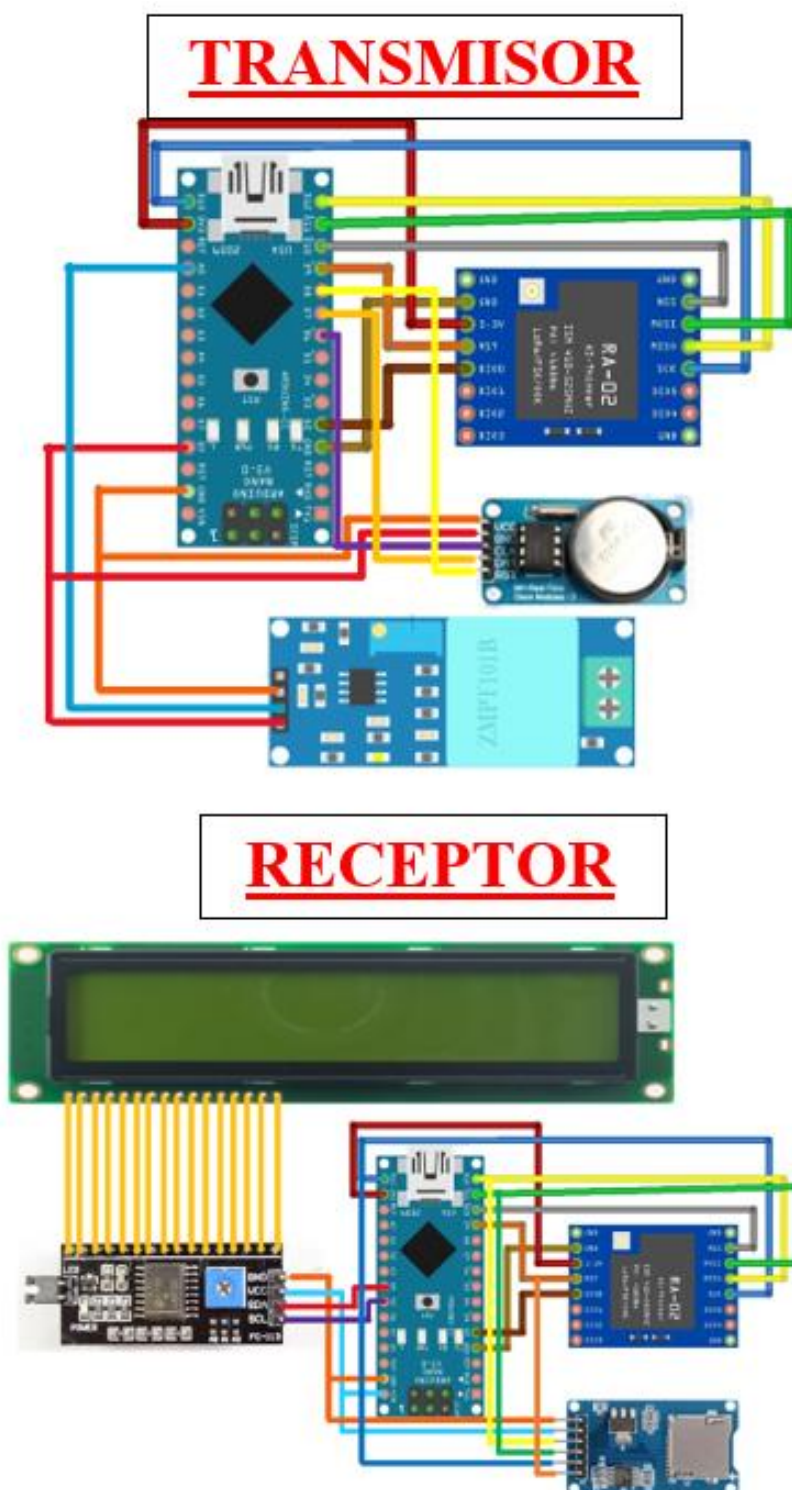


Figura 27. Diagrama de conexión del dispositivo de monitoreo.

ANEXO B: VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO

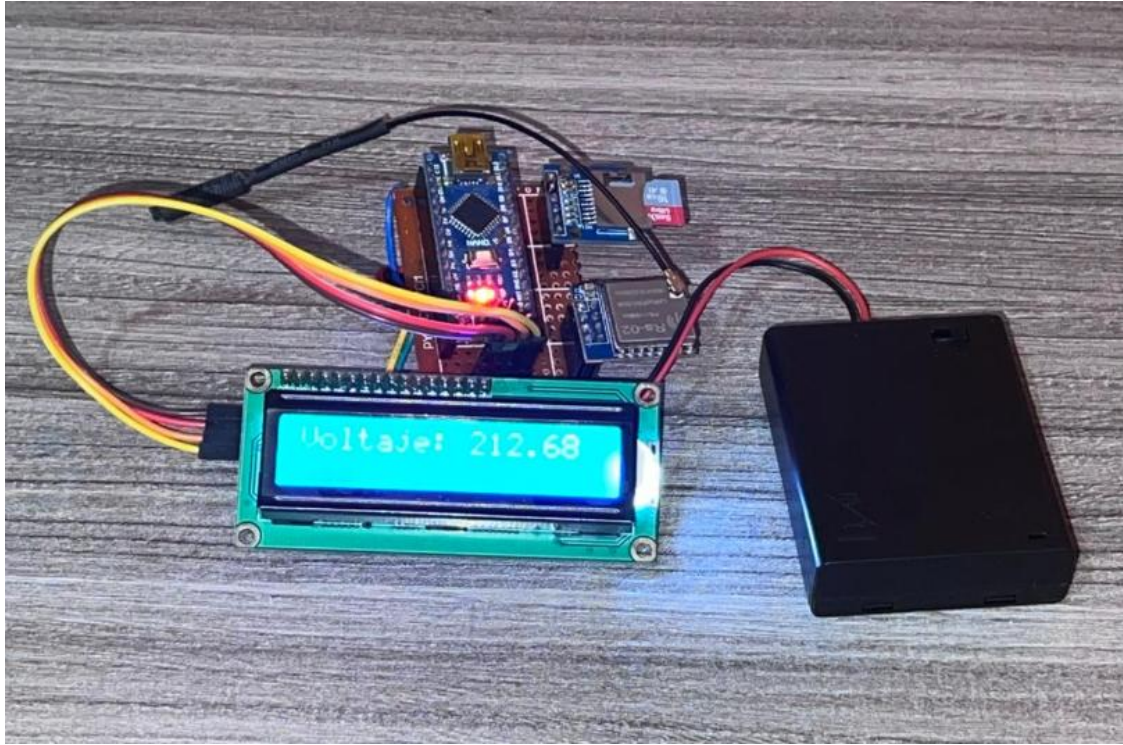


Figura 28. Dispositivo de monitoreo tomando valores

