



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

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

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Autor:

Molina Moya, Alberto Damian

Tutor:

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Alberto Damian Molina Moya**, con cédula de ciudadanía **1805342258**, autor del trabajo de investigación titulado: **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**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 17 de mayo de 2024.



Alberto Damian Molina Moya
C.I: 1805342258

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **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**, presentado por **Alberto Damian Molina Moya**, con cédula de identidad **1805342258**, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la APROBACIÓN de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba el 17 de mayo de 2024.

Ph.D. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Dr. Manuel Antonio Meneses Freire
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Msc. José Luis Jinez Tapia
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ph.D. Daniel Antonio Santillán Haro
TUTOR

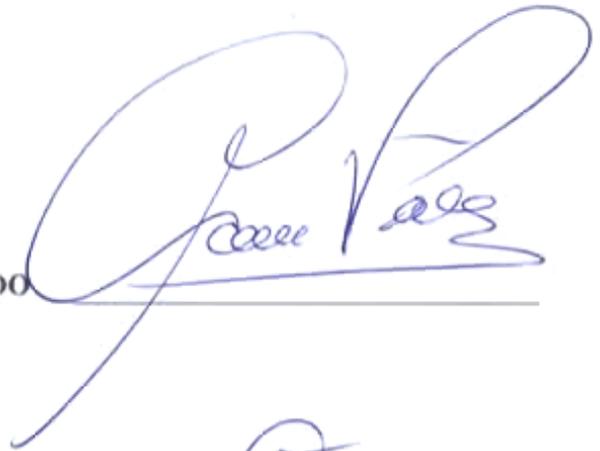


CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **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**, presentado por **Alberto Damian Molina Moya**, con cédula de identidad **1805342258**, bajo la tutoría de Ph.D. Daniel Antonio Santillán Haro; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba el 17 de mayo de 2024.

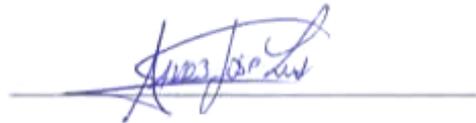
Ph.D. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Dr. Manuel Antonio Meneses Freire
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Msc. José Luis Jinez Tapia
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



CERTIFICADO ANTIPLAGIO



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **MOLINA MOYA ALBERTO DAMIAN** con CC: **1805342258**, estudiante de la Carrera **ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**, Facultad de INGENIERIA; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"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"**, cumple con el 4%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 25 de Abril de 2024



PhD. Daniel Santillán
TUTOR

DEDICATORIA

Con gratitud infinita y el corazón rebosante de amor, dedico este logro a quienes han sido mis pilares inquebrantables en esta travesía. A mi amada madre, Rocío Moya, cuya fortaleza y sabiduría han sido mi faro en los momentos más oscuros, guiándome con amor y dedicación hacia mis metas.

A mi querida familia, cuyo apoyo incondicional ha sido mi fuerza motriz en cada paso del camino. Y a ti, Mirian Moya, aunque no pudiste acompañarme hasta el final, tu presencia y apoyo fueron una razón fundamental para alcanzar este momento. Gracias por ser parte de mi historia y por inspirarme a persistir en busca de mis sueños. Este logro lleva impreso vuestro amor y aliento, y por ello, lo comparto con todo mi ser. ¡Gracias por creer en mí y por ser mi luz en la oscuridad!

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor PhD. Daniel Antonio Santillan Haro por su guía experta y constante apoyo a lo largo de este desafiante camino académico. A mis revisores, les agradezco profundamente por sus valiosas sugerencias y contribuciones que han enriquecido este trabajo. Y finalmente, no puedo dejar de reconocer el apoyo inquebrantable de todos aquellos que me acompañaron en este viaje. Su aliento y respaldo fueron el motor que impulsó cada paso.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPITULO I	16
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Antecedentes	17
1.2 Planteamiento del Problema	18
1.3 Justificación	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo General.....	20
1.4.2 Objetivos Específicos	20
CAPITULO II.....	21
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Red de área amplia de baja potencia (LPWAN).....	21
2.2 Arquitectura de una red LPWAN	21
2.3 Tecnologías LPWAN.....	22
2.3.1 LoRa (Long Range).....	23
2.3.2 SigFox.....	25
2.3.3 NB-IoT.....	26
2.4 Energía Eléctrica.....	27
2.4.1 Instalación eléctrica	29
2.4.2 Acometida.....	29
2.4.3 Equipos de Medición.....	30
2.4.4 Medidor Analógico.....	30

2.4.5	Medidor Digital	31
2.4.6	Medidor inteligente (Smart Meter).....	31
CAPITULO III		33
3.	METODOLOGÍA	33
3.1	Modalidad de la Investigación	33
3.1.1	Investigación Bibliográfica.....	33
3.1.2	Investigación Experimental	33
3.1.3	Investigación de Campo	33
3.2	Diseño de la Investigación	33
3.3	Técnica de recolección de datos	34
3.3.1	Observación	34
3.4	Población de estudio y tamaño de muestra.	35
3.4.1	Población	35
3.4.2	Muestra	35
3.5	Operacionalización de variables	36
3.6	Métodos de análisis.....	36
3.6.1	Método analítico	36
3.7	Etapas iniciales de proyecto.....	36
3.7.1	Definición de la tecnología LPWAN.....	36
3.7.2	Análisis comparativo	36
3.8	Diseño del subsistema de comunicaciones	37
3.8.1	Arquitectura del subsistema de comunicaciones	38
3.8.2	Diseño de la red y sus componentes	39
3.8.3	LILYGO® TTGO T-Beam V1.1 LoRa 868 MHz.....	39
3.9	Diseño del subsistema electrónico de medición	42
3.9.1	Componentes	43
3.9.2	Sensor no invasivo PZEM-004T-100A	44
3.9.3	Pantalla Nextion Nx8048t050 5 Pulgadas.....	45
3.10	Modelado 3D del sistema de alojamiento de componentes	46
3.11	Selección de plataforma web	48
CAPÍTULO IV		51
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1	Implementación del prototipo	51
4.2	Ensamblaje de la placa principal.....	51

4.3	Implementación del diseño de transmisores	52
4.4	Implementación del receptor.....	52
4.5	Instalación de componentes	53
4.6	Instalacion y configuracion del receptor.....	55
4.7	Visualización de datos	56
4.8	Pruebas y validación	56
4.8.1	Pruebas de transmisión a diferentes distancias.....	56
4.8.2	Mediciones realizadas de 250m hasta 600m	57
4.8.3	Mediciones realizadas desde 1km hasta 1,8km aproximadamente.	58
4.9	Resultados estadísticos.....	59
4.9.1	Recolección de datos	59
4.9.2	Base de datos RSSI con respecto a la distancia.....	60
4.9.3	Prueba de normalidad	62
4.9.4	Análisis de regresión	63
4.9.5	Análisis de varianza (ANOVA).....	63
4.9.6	Análisis de correlación	67
4.9.7	Discusión	67
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
5.1	Conclusiones	68
5.2	Recomendaciones	69
6.	BIBLIOGRAFÍA	70
7.	ANEXOS	76

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Selección de variables	36
Tabla 2 Análisis comparativo de tecnologías LPWAN.....	36
Tabla 3 Especificaciones de LILYGO® TTGO T-Beam V1.1 [66].	40
Tabla 4 Especificaciones modulo LoRa [66].	41
Tabla 5 Especificaciones modulo GPS.....	41
Tabla 6 Gestión de batería	41
Tabla 7 Cálculo de potencias de una vivienda promedio.	44
Tabla 8 Rangos y formatos de medida del sensor.	45
Tabla 9 Especificaciones Pantalla Nextion Nx8048t050 5'' [70].	46
Tabla 10 Resultados de transmisión de 250m hasta 600m.....	57
Tabla 11 Resultados de transmisión de 1km a 1,8 km.	59
Tabla 12 Valor RSSI con respecto a la distancia.....	60
Tabla 13 Prueba de normalidad.....	62
Tabla 14 Resumen del modelo del análisis de regresión.....	63
Tabla 15 Análisis de varianza (ANOVA).....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Arquitectura de una red LPWAN [24].	22
Figura 2 Tecnologías LPWAN [25].	23
Figura 3 LoRa y LoRaWAN [31].	24
Figura 4 Arquitectura SigFox [34].	25
Figura 5 Arquitectura NB-IoT [39].	27
Figura 6 Etapas de una red eléctrica [43].	28
Figura 7 Acometida eléctrica.	30
Figura 8 Medidor analógico [56].	30
Figura 9 Medidor digital [56].	31
Figura 10 Estructura de un medidor inteligente de energía eléctrica.	32
Figura 11 Diseño de la investigación.	34
Figura 12 Subsistema de comunicación.	38
Figura 13 Topología de red en estrella.	39
Figura 14 Tarjeta LILYGO® TTGO T-Beam V1.1 [66].	40
Figura 15 Tarjeta programable con Arduino IDE.	42
Figura 16 Diseño del subsistema de medición.	43
Figura 17 Contactor eléctrico [68].	43
Figura 18 Sensor PZEM-004T-100A [69].	45
Figura 19 Pantalla Nextion Nx8048t050 5 Pulgadas.	46
Figura 20 Sistema de alojamiento para transmisores.	47
Figura 21 Modelado 3D de transmisores.	47
Figura 22 Modelo 3D de la pantalla del receptor.	48
Figura 23 Modelo 3D del receptor.	48
Figura 24 Diseño de la interfaz de Blynk para el monitoreo de datos.	50
Figura 25 Aplicación móvil de Blynk.	50
Figura 26 Diseño placa PCB.	51
Figura 27 Placa principal ensamblada.	52
Figura 28 Transmisor ensamblado.	52
Figura 29 Receptor ensamblado.	53
Figura 30 Instalación del sensor PZEM-004T-100A.	54
Figura 31 Instalación del contactor.	54
Figura 32 Instalación completa del transmisor.	55

Figura 33 Instalación del receptor.	55
Figura 34 Tabla de datos descargado de Blynk.	56
Figura 35 Formato de recepción de paquetes.	57
Figura 36 Transmisión a 300m.	57
Figura 37 Transmisión a 1km.	58
Figura 38 Transmisión a 1800m.	58
Figura 39 Función packetRssi().	60
Figura 40 Estimación de modelo.	61
Figura 41 Gráfico de medias de la calidad de la señal con respecto a la distancia.	64
Figura 42 Diagrama de cajas de RSSI con respecto a la distancia (rangos).	64
Figura 43 Porcentaje de paquetes exitosos con respecto a la distancia.	65
Figura 44 Media de probabilidad de pérdida de paquetes.	66
Figura 45 Media de probabilidad de entrega de paquetes exitosos.	66

RESUMEN

En la actualidad, las empresas de distribución eléctrica en el país llevan a cabo de forma manual el registro de consumo en los medidores de energía en zonas rurales, lo que conlleva a cometer errores en las lecturas. Por consiguiente, la implementación de redes LPWAN para el monitoreo del consumo eléctrico ha surgido como una solución para abordar desafíos en la gestión de la energía. Esta introducción de redes LPWAN no solo mejora la precisión de las mediciones, sino que también optimiza la gestión de recursos.

En este sentido, el presente proyecto tiene como objetivo la implementación de una red LPWAN para el monitoreo del consumo eléctrico. En donde se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las tecnologías LPWAN más comunes, como Sigfox, LoRa y NB-IoT, para conocer sus características y determinar su idoneidad para el propósito del estudio. Posteriormente, se procedió a la selección de LoRa como la tecnología preferida, basándose en sus ventajas significativas.

Durante la investigación, se llevaron a cabo pruebas y mediciones para evaluar el rendimiento y la eficacia de la red implementada en condiciones reales. Se recopilaron datos sobre la calidad de la señal, y la fiabilidad de la transmisión de datos. Donde se obtuvo resultados prometedores y significativos. Se logró establecer una comunicación eficiente y confiable entre los dispositivos de la red, demostrando la viabilidad y robustez de la tecnología LoRa en entornos residenciales rurales. Se observó una cobertura de señal adecuada, que permitió la transmisión de datos de consumo de manera efectiva en áreas remotas.

Palabras claves: consumo eléctrico, red, LPWAN, LoRa

ABSTRACT

Currently, electricity distribution companies in the country manually record energy consumption on meters in rural areas, leading to errors in readings. Consequently, the implementation of LPWAN networks for monitoring electricity consumption has emerged as a solution to address challenges in energy management. This introduction of LPWAN networks not only improves measurement accuracy but also optimizes resource management.

In this regard, the present project aims to implement an LPWAN network for monitoring electricity consumption. A comprehensive analysis of the most common LPWAN technologies, such as Sigfox, LoRa, and NB-IoT, is carried out to understand their characteristics and determine their suitability for the study's purpose. Subsequently, LoRa was selected as the preferred technology based on its significant advantages.

During the research, tests and measurements were conducted to evaluate the performance and effectiveness of the implemented network under real conditions. Data on signal quality and data transmission reliability were collected, yielding promising and significant results. Efficient and reliable communication was established between network devices, demonstrating the viability and robustness of LoRa technology in rural residential environments. Adequate signal coverage was observed, enabling effective transmission of consumption data in remote areas.

Keywords: electricity consumption, network, LPWAN, LoRa

Revisado por: Andrea Paola Goyes Robalino

Fecha: 02-05-2024

Firma:



CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de la sostenibilidad en las ciudades plantea la necesidad de implementar nuevas dinámicas urbanas, orientadas hacia la eficiencia energética, capaces de generar y consumir energía de manera eficiente e inteligente [1]. En este sentido, surge la tendencia de las ciudades inteligentes o “Smart City”, las cuales se apoyan en la infraestructura, la innovación y la tecnología como pilares fundamentales. Es así que, en 2006, surge el término “Internet de las Cosas” (IoT) para describir los esfuerzos destinados a lograr una comunicación práctica máquina a máquina, conocida como M2M. Desde entonces, la adopción de sistemas inteligentes como las Smart City o la Industria 4.0 ha llevado a la utilización de redes de sensores inalámbricos para la interacción ambiental y la medición de diversas variables. [2].

La telemetría y el IoT son dos tecnologías interconectadas que están transformando la forma en que recopilamos, transmitimos y utilizamos datos en diversos ámbitos. Del mismo modo, la telemetría es una técnica moderna que permite la recopilación de datos a grandes distancias de manera que se logra obtener información precisa sobre un elemento remoto, mientras que el IoT proporciona la infraestructura necesaria para la conectividad y comunicación entre estos dispositivos [3]. Entre las tecnologías clave utilizadas se encuentran el uso de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN). En este sentido, las LPWAN son redes con recursos limitados y se caracterizan principalmente por una operación de batería de larga duración, cobertura extendida, alta capacidad y bajos costos de dispositivos e implementación [4]. Estas redes permiten la conexión de dispositivos y sensores de bajo consumo de energía a larga distancia, proporcionando una cobertura amplia y una comunicación confiable.

En la actualidad, el uso de la energía eléctrica a nivel mundial es de mucha importancia para el desarrollo y sostenibilidad de la matriz energética. Además, el constante avance de los conceptos tradicionales en cuanto a redes eléctricas de distribución, exige la actualización de dicho concepto [5]. A pesar de esto, en naciones de América Latina, las redes eléctricas han experimentado escasos avances y en algunos casos, persiste el uso de tecnologías obsoletas [6]. Actualmente, en la mayoría de las zonas del Ecuador, el uso y lectura de los medidores análogos no llegan a ser muy intuitivos y entendibles para el consumidor [7]. Esto implica que, de forma periódica, trabajadores relacionados con las empresas de distribución eléctrica se acercan físicamente a cada medidor para tomar nota del consumo registrado.

Mientras que, en países europeos se ha optado por la implementación de medidores inteligentes, definido por la Directiva de la Unión Europea (UE) 2012/27 como “un sistema electrónico que puede medir el consumo de energía, proporcionando más información que un medidor convencional, y puede transmitir y recibir datos utilizando una forma de comunicación electrónica” [8]. Hoy estos dispositivos son una realidad a nivel mundial, entre

2018 y 2023, se espera que la tasa de penetración de los contadores inteligentes de electricidad en la UE crezca de aproximadamente el 44% al 71% [9].

El objetivo del proyecto radica en agilizar y automatizar el proceso de registro del consumo de energía eléctrica monofásica en los hogares con la implementación de una red LPWAN, eliminando la necesidad de mediciones manuales y mejorando la precisión de los datos recopilados. Por lo tanto, se propone implementar una red de medidores inteligentes con el objetivo de transmitir los datos de consumo directamente a una plataforma centralizada en la web, y de esta manera reducir el tiempo de lectura, corte y reconexión de suministro de energía eléctrica de forma remota.

En resumen, la implementación de una red LPWAN, para optimizar el proceso de registro del consumo de energía eléctrica monofásica residencial es una iniciativa prometedora en busca de una gestión más eficiente de la energía y la promoción de hábitos sostenibles. En su primera etapa se propone realizar una investigación exhaustiva de las diferentes tecnologías de redes LPWAN, más utilizadas como, Sigfox, LoRa y NB-IoT [10] y su aplicabilidad en el registro del consumo de energía eléctrica residencial. Además, se analizan las características técnicas y ventajas de esta tecnología en términos de eficiencia y alcance de transmisión de datos. En la segunda etapa se plantea la implementación del sistema de comunicaciones con la tecnología LPWAN adecuada. Por lo tanto, es necesario la programación de los dispositivos y la integración de los sensores para medir voltaje, corriente y potencia. Finalmente, con el objetivo de validar el prototipo se requiere una evaluación exhaustiva del funcionamiento y rendimiento, para lo cual se requiere de un conjunto de pruebas de transmisión de datos y medición de consumo. Por lo que es necesario comparar los resultados obtenidos con los registros manuales convencionales.

1.1 Antecedentes

Después de más de 20 años de desarrollo se estipulan que el mercado de IoT ha alcanzado una marca de aproximadamente 200 mil millones de dispositivos conectados en 2020, comenzando con solo 2 mil millones en 2006 [11]. En consecuencia, su evolución implica la combinación de diversas tecnologías y soluciones de comunicación. Esto incluye el uso de tecnologías de identificación y seguimiento, redes de sensores y actuadores tanto cableadas como inalámbricas, protocolos de comunicación mejorados y la implementación de inteligencia distribuida en los objetos inteligentes [12].

Por lo tanto, El uso de Internet podría contribuir a la configuración de redes eléctricas inteligentes y controlar en tiempo real [13], ya que desempeña un papel crucial en la implementación de los medidores inteligentes (del inglés, smart meters), integrando una comunicación bidireccional entre el medidor y el sistema central. de la empresa de servicios públicos, es decir, el operador de sistemas de distribución (DSO), lo que permite controlar de forma remota las funcionalidades del contador, como el apagado del suministro de energía [14].

Es así que, los autores A. Marahatta, Y. Rajbhandari [15], en su trabajo mencionan las ventajas significativas de los medidores inteligentes en comparación con los medidores analógicos tradicionales, pero señalan que estos nuevos medidores todavía enfrentan desafíos en términos de mecanismos de comunicación, consumo de energía y costos de implementación. Para abordar estos inconvenientes, los dispositivos LoRa ofrecen una solución. En este sentido, se llevó a cabo un estudio para implementar una red de medición de energía en áreas rurales, y los autores concluyeron, a través de simulaciones que una red configurada en malla cumple con las especificaciones LoRa necesarias para una implementación óptima de medidores inteligentes en micro redes rurales. Sin embargo, se mencionan limitaciones en relación con la escalabilidad durante la implementación, ya que la simulación no puede reflejar completamente esa realidad.

En 2020, en la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) en Sangolquí, Ecuador, M. Fernández y J. Uquillas [16], en su trabajo de titulación proponen un estudio sobre LoRaWAN, seguido del desarrollo de servicios IoT para un Smart Campus donde se recopilaban datos de variables como temperatura, humedad, calidad del aire, radiación UV y pH del agua, mismos que son visualizados a través de una interfaz web lo que permitió un monitoreo y análisis eficiente de la información recopilada. Como resultado, se concluyó que esta tecnología tiene un consumo de energía bajo y ofrece altas prestaciones. En cuanto a la infraestructura de red utilizada, se optó por un diseño centralizado o una topología en estrella. Esto permitió una mejor gestión de los recursos desde el nodo Gateway. Sin embargo, si el nodo Gateway falla, todo el sistema dejará de funcionar.

En 2023, A. Mallorquí [17], en su trabajo de investigación el cual consiste en lograr un intercambio confiable de datos de larga distancia en un entorno hostil, con el objetivo de implementar una arquitectura híbrida de Internet de las cosas (IoT) utilizando comunicaciones LoRa para ofrecer un servicio de telemetría más efectivo y confiable, mejorando la transmisión de datos en situaciones desafiantes. Concluye que, en redes como LoRa podría optimizar los recursos de la red para mejorar su rendimiento y evitar pérdidas de paquetes, mejorando la calidad del sistema. Por ejemplo, al ajustar las frecuencias de operación y ancho de banda para minimizar las interferencias mejorando la calidad de la conexión y el uso de antenas que tenga una ganancia adecuada y esté correctamente diseñada para el rango de frecuencias utilizadas por LoRa, mejorando la transmisión y minimizando las pérdidas de paquetes.

1.2 Planteamiento del Problema

En Ecuador, las empresas de distribución eléctrica llevan a cabo de forma manual el registro de los medidores de consumo de energía eléctrica, cabe destacar que en los últimos años el índice de cobertura eléctrica alcanza un 97% [18]. Esto implica que su personal debe desplazarse hasta cada medidor para recopilar la información almacenada en ellos o realizar algún control de suministro. Por lo tanto, esta tarea resulta bastante lenta debido al gran número de medidores existentes y a la extensa área que deben cubrir. Como resultado, el proceso no solo consume mucho tiempo, sino que también está sujeto a posibles errores en el registro de los datos.

Además, es importante destacar que el registro de los medidores se realiza de forma mensual, lo que significa que tanto las empresas concesionarias como los usuarios finales solo tienen acceso a la información de consumo una vez al mes. Esta limitación temporal tiene implicaciones significativas a la hora de tomar decisiones estratégicas para el ahorro y uso eficiente de la energía por parte de los usuarios.

La falta de conocimiento sobre cómo utilizan eficientemente la energía eléctrica en sus hogares es uno de los principales desafíos que enfrentan los usuarios. Actualmente, no existe un sistema que proporcione un registro individualizado del consumo de corriente y potencia en cada circuito eléctrico residencial, lo que dificulta identificar los puntos específicos donde se produce mayor demanda de potencia. Esta situación ha generado la necesidad de desarrollar un sistema de medición local y remota que permita reducir el tiempo de registro por parte del proveedor de servicio eléctrico local. De esta manera, los usuarios y proveedores podrían monitorear el consumo de energía, lo que les ayudaría a reducirlo de manera consciente y evitar gastos innecesarios a largo plazo. Además, al lograr un mejor aprovechamiento de la energía eléctrica, se contribuye a un uso más sostenible y responsable de los recursos disponibles.

Por lo tanto, es necesario contar con un proceso automatizado y altamente eficiente en términos de tiempo y recursos para las empresas concesionarias, que permita agilizar el acceso a los datos de consumo y tomar medidas oportunas para optimizar el uso de la energía eléctrica, lo que resultaría en beneficios tanto económicos como medioambientales.

1.3 Justificación

El proyecto de investigación tiene una relevancia tecnológica significativa, ya que busca desarrollar tecnologías que permitan la automatización del proceso de registro de medidores de consumo de energía en la red de distribución eléctrica del Ecuador. Con el propósito de proporcionar información precisa y actualizada sobre el consumo en períodos cortos de tiempo, así como mantener un historial de consumo para fomentar un uso responsable de la red eléctrica.

Desde una perspectiva económica, la implementación de este proyecto tiene una importancia destacada ya que, según las cifras manejadas por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, INEC, en el año 2017, el 62 % de la población ecuatoriana considera muy importante el ahorro energético en su hogar [19]. Al automatizar el registro de los medidores, se generaría un ahorro sustancial en tiempo y recursos para las empresas de distribución eléctrica en sus actividades operativas. Además, al brindar información detallada sobre el consumo energético a los clientes finales, se busca incentivar un uso eficiente de la energía eléctrica, lo que puede resultar en ahorros económicos para los usuarios.

En resumen, el proyecto busca un equilibrio entre la tecnología y la economía al mejorar la eficiencia de la gestión del consumo de energía y promover un uso responsable y consciente de los recursos, a través de la implementación de una red LPWAN que optimice

y automatice el registro del consumo de energía eléctrica monofásica en los hogares, eliminando la necesidad de mediciones manuales y mejorando la precisión de los datos obtenidos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Implementar una red de área amplia de baja potencia (LPWAN) en la parroquia Santa Rosa de Ambato, para el monitoreo y optimización del tiempo de registro de consumo, corte y reconexión del suministro eléctrico monofásico residencial rural.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar las diferentes tecnologías de redes LPWAN disponibles como LoRa, Sigfox y NB-IoT, comparando sus ventajas y desventajas en la integración con otras tecnologías de gestión de datos y monitorización de sensores a larga distancia.
- Diseñar e implementar el subsistema electrónico utilizando sensores no invasivos para medir voltaje, corriente, potencia, junto con una interfaz de usuario que permita medir y visualizar los datos de forma local.
- Implementar y configurar el subsistema de comunicaciones utilizando tecnología LPWAN con una topología en estrella, que permita la lectura remota, el corte y la reconexión del suministro eléctrico en 2 hogares, asegurando la transmisión de datos hacia la plataforma web Blynk para el registro y visualización remota de las mediciones.
- Probar y validar el prototipo para asegurar su correcto funcionamiento y su eficiencia en la optimización del tiempo de registro del consumo de energía eléctrica residencial.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Red de área amplia de baja potencia (LPWAN)

La tecnología LPWAN ha revolucionado la forma en que las comunicaciones inalámbricas se llevan a cabo en diversos campos, en conjunto con el IoT el cual ha mostrado un gran aumento en el espectro de aplicaciones como la industria, ciudades inteligentes, atención médica, entre otros [20]. En este sentido, LPWAN proporciona una solución eficiente y económica para conectar dispositivos de baja potencia y enviar datos a largas distancias con una cobertura generalmente de hasta 15 km, consumiendo una cantidad mínima de energía y bajos requisitos de mantenimiento [21].

La tecnología LPWAN ha permitido el despliegue masivo de objetos conectados a costos de infraestructura muy bajos. Proporciona conectividad de largo alcance a dispositivos económicos que operan con baterías, lo cual resulta especialmente beneficioso [22]. Estos dispositivos requieren transmitir pequeñas cantidades de datos en intervalos regulares durante períodos de vida útil prolongados. Es así que, esto ha abierto nuevas oportunidades en diferentes sectores, como el monitoreo remoto ya que la capacidad de LPWAN para brindar conectividad confiable y de bajo consumo energético ha impulsado la adopción masiva de dispositivos IoT, creando una red robusta y escalable para la transmisión de datos en tiempo real.

En comparación con otras tecnologías como WiFi, Bluetooth, ZigBee o NFC, se destaca por ofrecer enlaces de mayor alcance y una mayor escalabilidad. Esta capacidad de alcance amplio permite cubrir áreas extensas y conectar un mayor número de dispositivos de forma eficiente. En contraste con las tecnologías celulares como 2G, 3G o 4G, LPWAN ofrece una mayor autonomía para los dispositivos conectados [22]. Además, el costo de los dispositivos LPWAN es menor, lo que facilita su adopción a gran escala. También se destaca por su simplicidad en términos de conectividad para los nuevos dispositivos, lo que reduce la complejidad en la implementación y configuración de la red

2.2 Arquitectura de una red LPWAN

En general, la topología de las redes LPWAN es de estrella como se muestra en la figura 1, en la que los dispositivos finales establecen una comunicación con el Gateway, el cual retransmite los mensajes entre los nodos finales y el servidor de red [23].

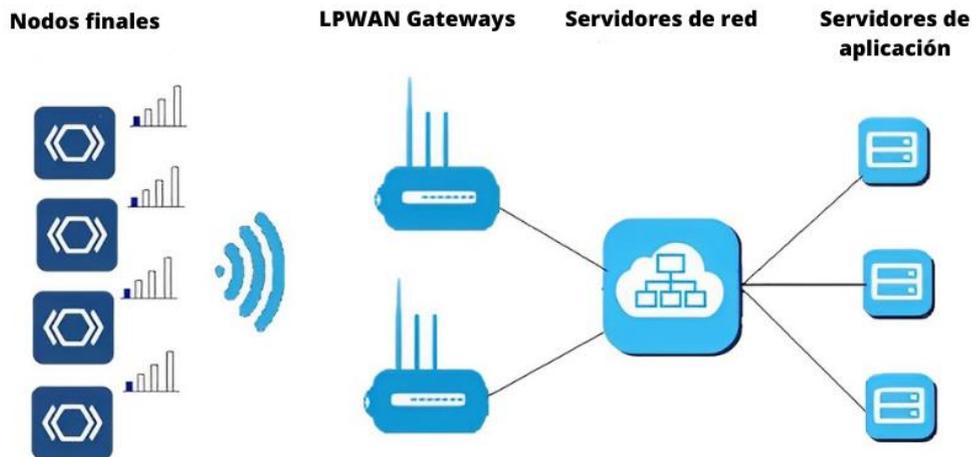


Figura 1 Arquitectura de una red LPWAN [24].

Como se puede observar en la Figura 1, la arquitectura tradicional de una red LPWAN se compone de los siguientes elementos:

- **Nodos finales:** elementos tales como sensores o actuadores que recogen información y la envían al gateway de la red [23].
- **Gateways o concentradores:** Son estaciones base, las cuales implementan LoRa, las cuales reciben información de múltiples dispositivos finales y se encargan de reenviarla a los servidores de red. Cada gateway reenviará los paquetes recibidos desde el nodo final al servidor de red a través de conexiones IP estándar [23].
- **Servidores de red:** Se encargan de gestionar toda la red, controlando los parámetros de esta para adaptar el sistema a las condiciones siempre cambiantes, y establecer conexiones seguras para el transporte de datos extremo a extremo. El servidor de red asegura la autenticidad de cada sensor en la red y la integridad de cada mensaje [23].
- **Servidores de aplicación:** Su función es manejar, administrar e interpretar los datos de la aplicación del sensor de manera segura. A través de ellos, el usuario obtiene la información [23].

2.3 Tecnologías LPWAN

Cuando se trata de cobertura de comunicación, consumo de energía y costos, las tecnologías de comunicación inalámbrica convencionales resultan insuficientes. En este sentido, las tecnologías de comunicación de largo alcance y bajo consumo de energía como SigFox, LoRa y NB-IoT logran abordar de manera efectiva las necesidades ya mencionadas [21]. Estas opciones son ampliamente utilizadas para establecer redes de sensores y soluciones IoT, es así que cada una de estas tecnologías tiene características distintas.



Figura 2 Tecnologías LPWAN [25].

En la Figura 2 se presenta un conjunto diverso de tecnologías LPWAN. Cada una de estas tecnologías posee especificaciones y funcionalidades particulares que las hacen adecuadas para diferentes entornos. Además, las aplicaciones en las que estas tecnologías se desempeñan son variadas y representan un avance significativo en el control industrial, la medición de variables, ambientales, industriales, etc. En este sentido, proporcionan los recursos suficientes para mejorar la eficiencia de algunas actividades como el cuidado de la salud, monitoreo de hogares, edificios y más.

2.3.1 LoRa (Long Range)

Las redes LPWAN amplían notablemente la gama de tecnologías de comunicación comunes basadas en redes de sensores inalámbricos (WSN) [26]. En este sentido, la tecnología LoRa atrae la atención de las comunidades académica e industrial, con varios estudios sobre los diferentes aspectos de la tecnología, como el rango de comunicación, la interferencia, la escalabilidad o la eficiencia energética [27]. De este modo, debido a su capacidad de penetración en edificios y su bajo consumo de energía, LoRa resulta adecuada para aplicaciones que requieren comunicación de larga distancia y larga duración de la batería.

Entre las características más relevantes encontramos: (1) LoRa presenta robustez frente al desvanecimiento multirrayecto o efecto Doppler; (2) utiliza una modulación patentada de espectro ensanchado chirp (CSS) lo cual proporciona robustez contra interferencias y una relación señal-ruido (SNR) muy baja que permite al receptor demodular la señal [28]. Esto lo logra mediante la utilización de técnicas de modulación de baja velocidad y ancho de banda reducido, lo que permite que los dispositivos LoRa transmitan datos a distancias de varios kilómetros en condiciones favorables. Además, la tecnología

LoRa permite una comunicación bidireccional, lo que significa que los dispositivos pueden enviar y recibir datos.

Es así que desde 2015, ha habido un creciente interés en la comunidad de investigación por la tecnología LoRa y su protocolo de comunicación LoRaWAN [29]. Como se muestra en la figura 2, LoRa es una modulación RF y corresponde a la capa física en el modelo de referencia OSI. Mientras que LoRaWAN es un protocolo de capa MAC que coordina el medio [30].

LoRaWAN es un protocolo de capa dos para proporcionar a los dispositivos finales LoRa funcionalidades de velocidad de datos adaptativa (ADR), seguridad, geolocalización sin GPS, acceso a canales y ahorro de energía [30]. Además, el protocolo de capa MAC define una clase obligatoria y dos clases opcionales para diferentes casos de uso posibles, en la figura 3 se presenta el tipo de clases definidas por el protocolo.



Figura 3 LoRa y LoRaWAN [31]

Clase A (menor potencia, dispositivos finales bidireccionales). Clase obligatoria en los dispositivos de la red. Las comunicaciones siempre son iniciadas por un dispositivo final y se llevan a cabo de manera asincrónica. Cada transmisión de subida (uplink) se envía en cualquier momento y luego son seguidas por dos ventanas de bajada (downlink), lo que permite la comunicación bidireccional [31].

Clase B (dispositivos finales bidireccionales con latencia de descarga determinista). Controlan las ventanas de recepción con intervalos de tiempo predeterminados y los dispositivos finales abren ventanas downlink solo a horas programadas [30].

Clase C (menor latencia, dispositivos finales bidireccionales). Estos dispositivos tienen la capacidad de estar siempre alimentados, lo que les permite escuchar de forma continua. Para reducir la latencia durante el downlink, el receptor del dispositivo final se

mantiene abierto incluso cuando no está transmitiendo. Esto permite al servidor de la red iniciar una descarga en cualquier momento [31].

2.3.2 SigFox

SigFox es una red global del Internet de las cosas que ofrece una forma eficiente de enviar datos sin necesidad de mantener conexiones de red constantes, los dispositivos SigFox funcionan en bajo consumo energético por lo que se puede considerar como una tecnología ecológica [32]. Al enviar paquetes de datos más reducidos, SigFox logra un consumo energético más eficiente en comparación con otras tecnologías, lo que es beneficioso para dispositivos alimentados por baterías, ya que pueden tener una vida útil más prolongada sin requerir recargas frecuentes.

Opera en frecuencias de 433MHz, 868MHz y 915MHz dependiendo de las regiones geográficas. La tecnología tiene restricciones estrictas en el número de paquetes (140 por día) y el tamaño del paquete (12 bytes) a enviar [30].

2.3.2.1 Arquitectura SigFox

SigFox consta de tres elementos fundamentales para su funcionamiento: dispositivos IoT, estaciones base SigFox (Gateways) y la plataforma en SigFox Cloud, [33] como se muestra en la figura 4.

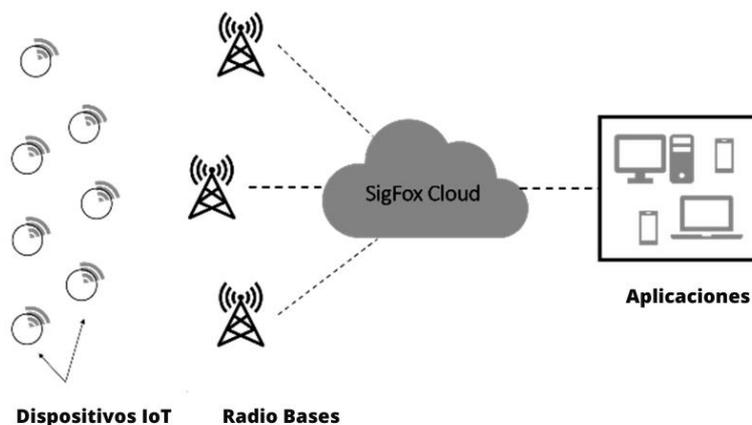


Figura 4 Arquitectura SigFox [34].

Los dispositivos IoT: son los componentes que se conectan a la red SigFox para enviar y recibir datos. Estos dispositivos pueden ser sensores, medidores u otros dispositivos inteligentes que recopilan información y la transmiten a través de la red SigFox.

Radio bases: se encarga de recibir los mensajes del nodo utilizando las frecuencias de 915 Mhz y retransmite el mensaje a la nube Sigfox. Estas estaciones bases no pueden ser configuradas y accedidas por los usuarios [35].

SigFox Cloud: conocido como BackEnd es responsable de manejar el almacenamiento, la gestión y la administración de los mensajes y nodos de la red. Este

componente se encuentra en el entorno del Internet y su función principal es proporcionar los mensajes al servidor del usuario [35].

En resumen, los dispositivos IoT transmiten mensajes a estaciones base que luego reenvían estos mensajes hacia la nube SigFox a través de una red basada en IP. En la nube de SigFox, los mensajes se procesan y luego se envían para ser examinados por los servidores del cliente [34].

2.3.3 NB-IoT

NB-IoT, abreviatura de Narrowband Internet of Things, es una tecnología de comunicación de banda ultra estrecha que ha sido desarrollada por el grupo 3GPP. Esta tecnología puede ser implementada tanto en redes GSM como en redes LTE [30]. En este sentido, el término banda estrecha se refiere al ancho de banda de NB-IoT de un máximo de 200 kHz gracias al cual puede coexistir en el espectro de GSM [36]. A diferencia de otras tecnologías como LoRaWAN y Sigfox, que se pueden implementar en redes privadas, NB-IoT está principalmente operado por operadores de red globales, lo que limita los despliegues de redes privadas. Esta característica puede tener implicaciones en la elección y alcance de las redes para implementaciones específicas [30].

NB-IoT es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica que opera en bandas de frecuencia con licencia. Esta tecnología ha sido estandarizada por el 3GPP (3rd Generation Partnership Project). El 3GPP es un organismo de estandarización que desarrolla estándares para las comunicaciones móviles, y ha establecido las especificaciones técnicas para NB-IoT, permitiendo su implementación en redes con licencia [37]. Por lo tanto, es una tecnología LPWAN basada en la infraestructura LTE, lo que lo convierte en un buen candidato para el despliegue de IoT. Entre las ventajas de NB-IoT se incluyen el soporte para una red de comunicación celular efectiva, cobertura de radio amplio con activación bidireccional entre los planos de datos y señalización, baja tasa de consumo de energía y capacidad para soportar las conexiones masivas de dispositivos [38].

Como se muestra en la figura 5, la arquitectura de esta tecnología al utilizar la infraestructura móvil LTE dependerá en su totalidad de la conexión que tenga sus nodos finales a la torre de telefonía más cercana, por lo tanto, para su correcto funcionamiento es necesario que su implementación sea dentro del área de cobertura de una red de telefonía móvil.

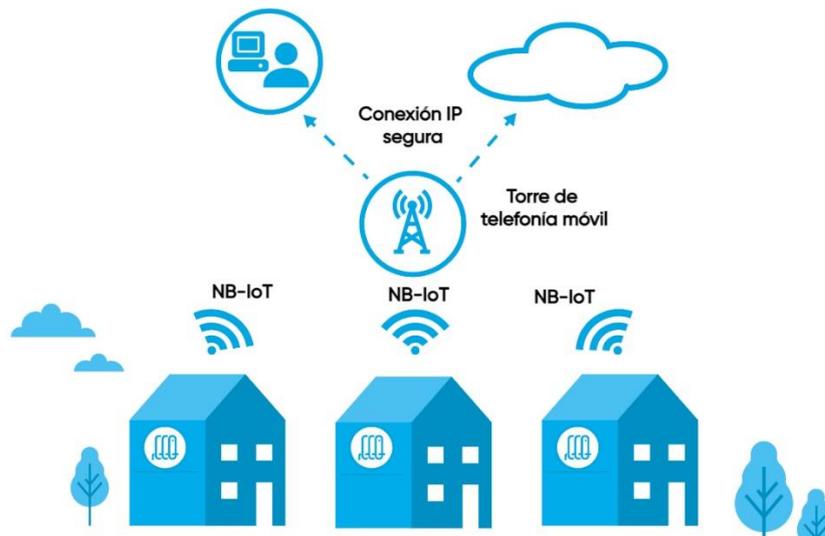


Figura 5 Arquitectura NB-IoT [39].

2.4 Energía Eléctrica

La energía eléctrica se distingue como un tipo de energía asociada con el movimiento de partículas cargadas. Las partículas que forman las distribuciones pueden ser electrones o iones y a estas partículas se les denomina portadores de carga [40], se genera a través de la conversión de otras formas de energía, como la energía química, mecánica o solar, en electricidad.

La electricidad es una forma de energía muy versátil y ampliamente utilizada en nuestra sociedad. Es así que, los sistemas de energía convencionales se basan en unas pocas fuentes de generación de energía centralizadas, principalmente sistemas de generación de energía hidroeléctrica o basados en combustibles fósiles [41]. De esta forma, la energía eléctrica desempeña un papel vital en el crecimiento económico y el desarrollo humano en todos los países. Su importancia radica en el hecho de que la energía es fundamental para abordar los principales desafíos y oportunidades que enfrenta nuestro mundo en la actualidad. Ya sea en términos de generación de empleo, en el sector de la salud, educación, transporte, en la industria, cambio climático, producción de alimentos o aumento de los ingresos, el acceso a la energía es esencial [42].

La red eléctrica es un sistema compuesto por una serie de componentes, equipos e instalaciones que desempeñan un papel crucial en el proceso de transformación de la energía eléctrica, con el objetivo de garantizar el suministro de energía a las empresas encargadas de la distribución. En la figura 6 se puede apreciar el esquema que representa las diferentes etapas que conforman una red eléctrica, que van desde la generación de la energía eléctrica, su transmisión y finalmente su distribución al consumidor final que puede ser de tipo doméstico o industrial según lo requiera.

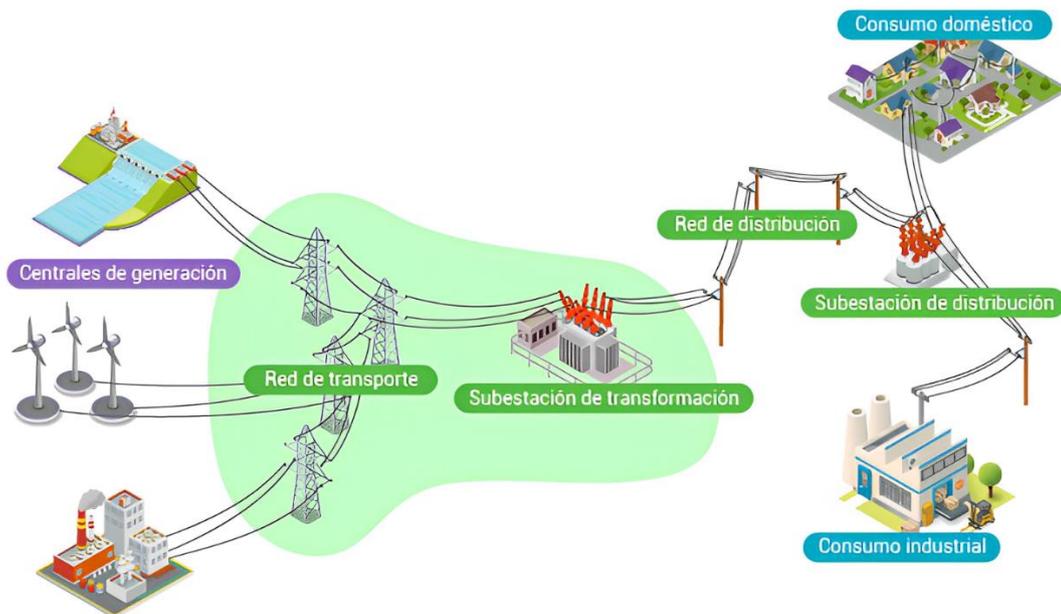


Figura 6 Etapas de una red eléctrica [43].

Como se muestra en la figura 6, la red eléctrica está conformada por tres fases. En su primera fase, la generación, se encarga de transformar alguna clase de energía que pueden ser plantas de energía alimentadas por diversas fuentes como el sol, el agua, el aire y la energía geotérmica (proveniente del calor interno del planeta), o de fuentes no renovables como, combustibles fósiles, energía nuclear, hidroeléctrica [44], en energía eléctrica. En la fase de transporte, la red lleva la energía eléctrica desde los puntos de generación a los puntos de distribución compuesta por torres, cables y líneas de transmisión estas están diseñadas para transmitir electricidad a través de largas distancias, y durante este proceso, se produce una pérdida de energía, sin embargo, al utilizar voltajes altos disminuye las pérdidas por resistencia [45]. Por último, la fase de distribución, es la parte del sistema de suministro eléctrico cuya función es el suministro de energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales [46].

En Ecuador, la transmisión de energía eléctrica se lleva a cabo mediante el Sistema Nacional de Transmisión (SNT). Este sistema consiste en un conjunto de líneas de transmisión y subestaciones que incluyen equipos para la transformación, compensación, protección, maniobra, conexión, control y comunicaciones. Estos componentes están destinados a proporcionar el servicio público de transporte de energía eléctrica y son operados por la empresa única de transmisión CELEC EP [47] [48].

Una vez que la electricidad llega a las áreas urbanas o rurales, se inicia la fase de distribución. Esta etapa implica la conexión de la electricidad a través de redes de distribución de baja tensión, compuestas por postes, cables y transformadores. Los transformadores se utilizan para adaptar los niveles de voltaje al reducir/elevar las tensiones de transmisión y distribución a los requerimientos específicos de los usuarios finales [49].

2.4.1 Instalación eléctrica

Una instalación eléctrica se compone de una variedad de elementos que trabajan en conjunto para suministrar energía eléctrica desde las centrales generadoras hasta los puntos de consumo, ya sea domiciliario o de consumo industrial [50]. Estos elementos incluyen transformador, equipos de medición, acometida, tablero general de distribución, protecciones y conductores que se encargan de facilitar el flujo de energía eléctrica de manera segura y eficiente [51]. La instalación eléctrica es fundamental para asegurar que la energía generada sea distribuida de manera adecuada y llegue a los equipos y dispositivos que necesitan electricidad para operar correctamente.

La red de distribución de baja tensión de una empresa eléctrica está compuesta por una serie de elementos que permiten llevar la electricidad desde las instalaciones de la empresa hasta el hogar o negocio del cliente. Estos elementos incluyen [52]:

Subestaciones. - Son lugares donde se realiza la transformación de la electricidad de alta tensión a baja tensión, para que pueda ser distribuida de manera segura y eficiente a los consumidores.

Transformadores. - Son dispositivos ubicados en las subestaciones que se encargan de reducir la tensión eléctrica de la corriente, preparándola para su distribución en baja tensión.

Red de distribución. - Consiste en una red de cables y líneas eléctricas que se extienden desde las subestaciones hasta los puntos de conexión de los clientes. Estas líneas de distribución se distribuyen por calles, avenidas y zonas residenciales.

Línea de acometida. - Distribuye las líneas de energía eléctrica hacia los medidores.

Contadores eléctricos. - Son dispositivos que se instalan en los domicilios o locales de los clientes para medir el consumo de electricidad [52].

2.4.2 Acometida

En una instalación eléctrica, la acometida se refiere al punto de conexión entre la red eléctrica pública y la instalación eléctrica del consumidor final. Siendo este el punto donde se establece la conexión física y eléctrica entre la red de suministro de energía y el sistema eléctrico interno de una propiedad, como se muestra en la figura 7. Consta de una caja de conexión, donde se instalan los medidores de electricidad y los dispositivos de protección, como interruptores o fusibles [53].

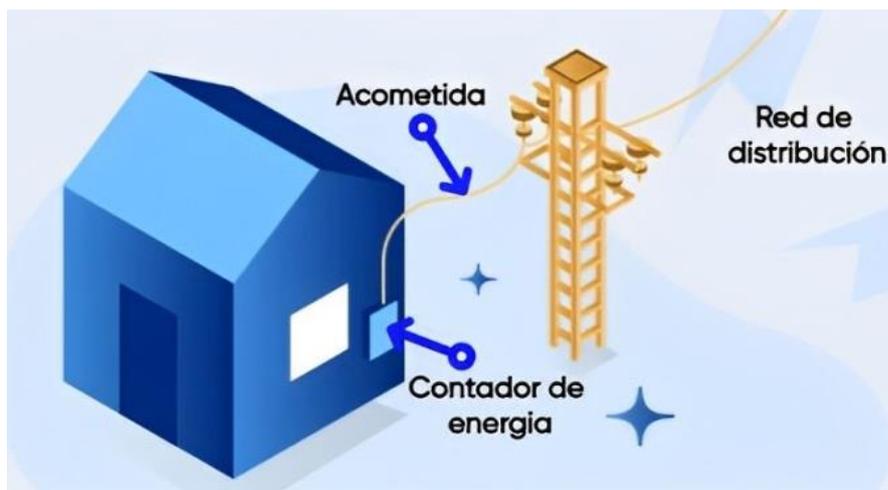


Figura 7 Acometida eléctrica.

2.4.3 Equipos de Medición

Los medidores son dispositivos utilizados por las compañías eléctricas para medir y registrar el consumo de energía eléctrica en los hogares, comercios y otras instalaciones. Estos equipos son conocidos comúnmente como medidores y desempeñan un papel fundamental en el seguimiento y facturación del consumo eléctrico de los usuarios [51]. Están diseñados para medir la cantidad de energía eléctrica consumida en términos de kilovatios-hora (kWh) [54].

2.4.4 Medidor Analógico

También conocido como medidor de dial (o electromecánico), este dispositivo opera principalmente mediante la generación de campos magnéticos utilizando dos conjuntos de bobinas. Estas bobinas interactúan directamente con un disco, como se muestra en la figura 8 puede contener de 4 a 6 diales que indican el consumo y giran en torno al disco central, el cual comienza a girar como resultado de la fuerza magnética ejercida sobre él [55].



Figura 8 Medidor analógico [56].

2.4.5 Medidor Digital

Un medidor de consumo eléctrico digital funciona de manera diferente a un medidor analógico o electromecánico. En lugar de utilizar mecanismos mecánicos, se basa en componentes electrónicos y tecnología digital para medir y registrar el consumo de energía eléctrica [47]. Además, son mucho más eficientes en cuanto a medición y tomas de lectura, contienen una pantalla como se muestra en la figura 9 que proporciona la información de consumo precisa y no puede ser manipulada.



Figura 9 Medidor digital [56].

Por lo tanto, los medidores analógicos fueron reemplazados por los medidores digitales ya que estos tenían un disco que podía ser manipulado, lo que aumentaba el riesgo de robo de energía. En cambio, los medidores digitales ofrecen una mayor seguridad y precisión en la medición del consumo, al utilizar un sistema electrónico que es más difícil de manipular.

Además, los medidores electromecánicos no podían mostrar información en tiempo real sobre el uso de energía. Esto dificultaba la obtención de lecturas precisas y eficientes del consumo. Por otro lado, los medidores digitales permiten una lectura instantánea y precisa del consumo de energía, lo que facilita el monitoreo y la gestión de la energía utilizada.

2.4.6 Medidor inteligente (Smart Meter)

Las redes inteligentes de energía son sistemas que incluyen dispositivos diseñados para operar de manera eficiente en términos de consumo energético y con habilidades de comunicación y control a distancia [57]. Por lo tanto, algunos de estos dispositivos, como los medidores de energía inteligentes, se convierten en opciones atractivas para su utilización en la industria de generación y distribución de energía, permitiendo así materializar la visión de las Smart Grids o redes eléctricas inteligentes.

En este sentido, los medidores inteligentes son dispositivos equipados con tecnología avanzada, con la capacidad de medir y registrar el consumo de electricidad en intervalos de tiempo más cortos, generalmente de una hora o incluso menos. La información recopilada por estos medidores se transmite de vuelta a la empresa distribuidora, permitiendo un

monitoreo preciso del consumo y facilitando la facturación en una fecha específica [58]. Estos medidores representan una evolución significativa en la gestión y control eficiente de la energía eléctrica ya que permite al usuario saber cuánta energía se está consumiendo.

Los dispositivos cuentan con sensores integrados que les permiten realizar diversas funciones de manera automatizada. Cada sensor está diseñado para monitorear y medir la calidad de energía y otros parámetros importantes relacionados con el suministro eléctrico [59]. Además, cuentan con una comunicación bidireccional entre el consumidor y el distribuidor, son capaces de detectar cortes de energía. Por lo tanto, puede enviar la lectura de consumo directamente a la compañía de servicios y proporciona a los consumidores todos los detalles sobre su consumo y costes [60]. Esta información permite a la red eléctrica gestionar los eventos de falla y los rápidos cambios en la energía.

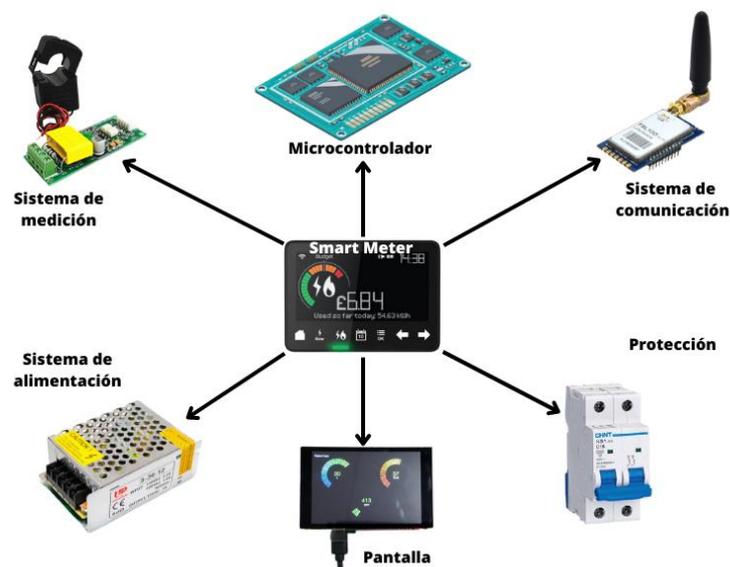


Figura 10 Estructura de un medidor inteligente de energía eléctrica.

La estructura de un medidor inteligente generalmente se compone de distintos subsistemas como se muestra en la figura 10. El proceso de adquisición de datos se realiza mediante las mediciones de los sensores locales para diferentes propósitos, como almacenamiento, visualización y análisis [60].

Adicional cuenta con un subsistema de comunicaciones para examinar y administrar medidores inteligentes de forma remota, proporcionando una conexión bidireccional con el Smart Meter (SM), creando redes de área doméstica (HAN), redes vecinales e incluso redes de área amplia (WAN), debido a su escalabilidad [61].

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

Se define como el conjunto de procesos y técnicas que se deben seguir para llegar a una meta, de esta forma la metodología comprende el estudio de los procedimientos que se utilizan para llevar a cabo una investigación de manera ordenada, rigurosa y eficiente con fin de obtener nuevos conocimientos en el campo científico [62]. Está diseñada para proporcionar un marco estructurado que guía al investigador en la planificación, ejecución y análisis de un estudio con el objetivo de obtener información válida y confiable.

3.1 Modalidad de la Investigación

La finalidad del presente proyecto es el monitoreo y optimización del tiempo de registro de consumo, corte y reconexión del suministro eléctrico monofásico residencial, a través de la implementación de una red LPWAN, por lo que se contó con las siguientes modalidades de investigación:

3.1.1 Investigación Bibliográfica

Se obtuvo información relevante de libros, revistas, artículos, documentación web y bases de datos científicas de diversos repositorios de las universidades del Ecuador y del mundo. Estas fuentes de información se seleccionaron debido a su relación con el tema de investigación y desempeñan un papel crucial para la ejecución del proyecto. La revisión exhaustiva de esta literatura especializada permite obtener una visión amplia y actualizada sobre el tema, así como acceder a los avances y conocimientos previos existentes en el área.

3.1.2 Investigación Experimental

En la investigación de enfoque experimental, el investigador tiene la tarea de manipular una o más variables de estudio para observar y controlar el efecto de esos cambios en las conductas observadas [63]. En este caso específico, se implementa un dispositivo y se llevan a cabo pruebas de validación con el fin de recopilar datos que permitan determinar la efectividad del dispositivo.

3.1.3 Investigación de Campo

La investigación de campo se enfoca en recopilar datos directamente de la realidad para obtener información de primera mano sobre un problema específico. En este sentido, se plantea llevar a cabo una comparativa utilizando medidores existentes en las viviendas, lo cual permite analizar el funcionamiento del prototipo en relación a esos medidores. Esta metodología proporciona datos concretos y contextualizados, permitiendo evaluar y comprender cómo se desempeña el prototipo en comparación con los medidores ya establecidos en el entorno real de las viviendas.

3.2 Diseño de la Investigación

El diseño e implementación de una red LPWAN, para optimizar el proceso de registro del consumo de energía eléctrica monofásica residencial, se establecen cuatro etapas como se detalla a continuación:

ETAPA I. se propone realizar una investigación exhaustiva de las diferentes tecnologías de redes LPWAN, por ejemplo, Sigfox, LoRa y NB-IoT [10] y su aplicabilidad en el registro del consumo de energía eléctrica residencial. Además, se analizan las características técnicas y ventajas de esta tecnología en términos de eficiencia y alcance de transmisión de datos.

ETAPA II. Implementación del sistema de comunicaciones con la tecnología previamente seleccionada. Por lo tanto, se lleva a cabo la programación de los dispositivos (Nodos finales, Gateway, plataforma web)

ETAPA III. Configuración del sistema electrónico para la integración de los sensores para medir voltaje, corriente, potencia y actuadores para el corte y reconexión del suministro eléctrico.

ETAPA IV. Evaluación del funcionamiento y rendimiento del prototipo, realizando pruebas de transmisión de datos y medición de consumo. Además, se comparan los resultados obtenidos con los registros manuales convencionales. En la figura 11 se muestra el proceso de diseño del prototipo.

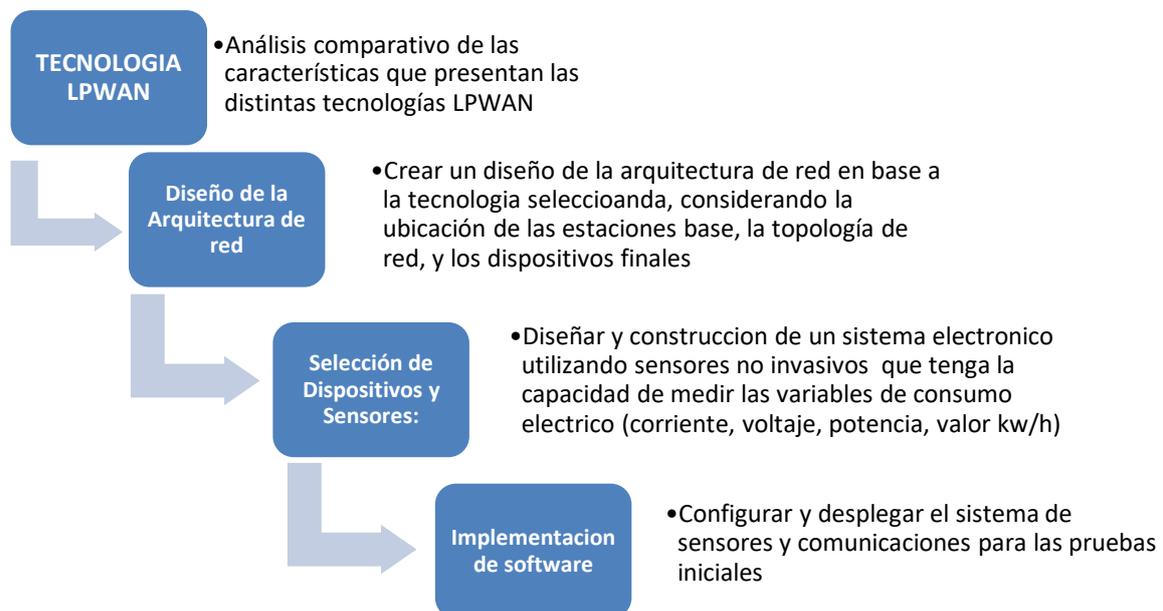


Figura 11 Diseño de la investigación.

3.3 Técnica de recolección de datos

3.3.1 Observación

En el marco de esta investigación, la técnica a utilizar es la observación. Se ha optado por esta metodología con el propósito de captar detalles específicos y comportamientos en tiempo real, de tal forma que se pueda obtener una perspectiva más inmediata y

contextualizada. Por lo tanto, la observación se presenta como una herramienta estructurante que permite una visualización ordenada y sistemática de los elementos relevantes para los objetivos del estudio.

3.4 Población de estudio y tamaño de muestra.

3.4.1 Población

Este proyecto se centra en establecer una red de monitoreo con dos ubicaciones específicas, dado que la cobertura de la red no abarca un área muy extensa. Por lo tanto, hemos seleccionado una población específica de mediciones para analizar la calidad de la señal proporcionada por los dispositivos LoRa, todas tomadas a una distancia de 2 kilómetros. Elegimos esta distancia debido a su importancia en la aplicación práctica de la tecnología LoRa y su probable influencia en la transmisión y recepción de señales. Este enfoque nos permite investigar de manera precisa y detallada cómo varía la calidad de la señal en relación con esta distancia particular, lo que en última instancia contribuye a una comprensión más profunda de la eficacia y las limitaciones de los dispositivos LoRa en diversos escenarios de despliegue.

3.4.2 Muestra

$$n = \frac{N * z^2 * p * (1 - p)}{(N - 1) * e^2 + z^2 * p * (1 - p)}$$

Donde:

- n = Tamaño de la muestra
- N = Tamaño de la población (40)
- z = Valor z para el nivel de confianza deseado (aproximadamente 1.96 para un nivel de confianza del 95%)
- p = Proporción estimada del atributo en la población (generalmente 0.5 si no tienes información previa)
- e = Margen de error (0.05 en este ejemplo)

Calculando esto, obtenemos el tamaño de la muestra necesario para tu estudio:

$$n \approx 36,34$$

Para este estudio, se determinó que se necesitaban 36 mediciones de calidad de señal para analizar la relación entre la distancia y la calidad de la señal proporcionada por los dispositivos LoRa. Considerando una distancia máxima de 2km se determinó una población de 40 puntos, con ello se procedió a seleccionar una muestra representativa de mediciones de calidad de señal. La muestra se seleccionó de manera que reflejara la diversidad de condiciones y contextos en los cuales los dispositivos LoRa podrían ser desplegados, asegurando así una comprensión integral de su desempeño en una gama amplia de escenarios de aplicación.

3.5 Operacionalización de variables

Tabla 1 Selección de variables

Variable dependiente	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Tasa de éxito de la transmisión de datos	Proporción de intentos de transmisión de datos que se completan con éxito sin errores	1. Numero de paquetes exitosos 2. Numero de paquetes perdidos 3. Calidad de la señal RSSI	- Laptop
Variable independiente	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Distancia entre el nodo final y la estación base LoRa	Distancia en metros comprendida entre el nodo final y la estación base LoRa	1. Distancia lineal en metros	- Cinta métrica

3.6 Métodos de análisis

3.6.1 Método analítico

El análisis de una red implica evaluar diversos aspectos para garantizar su rendimiento, eficiencia y confiabilidad. Entonces, un enfoque analítico permitirá obtener una visión integral de la red, asegurando su capacidad para satisfacer las necesidades específicas del proyecto.

3.7 Etapa inicial de proyecto

3.7.1 Definición de la tecnología LPWAN

Es una categoría de tecnologías de comunicación inalámbrica diseñada para permitir la conectividad de dispositivos de bajo consumo de energía a larga distancia. Las principales características de estas soluciones de comunicación inalámbrica son: i) una amplia cobertura que supera los 1000 metros, ii) un consumo de energía extremadamente bajo en los dispositivos finales y iii) una notable capacidad de escalabilidad [64]. Existen varias tecnologías LPWAN en el espectro con licencia tecnologías como NB-IoT, mientras que en las frecuencias sin licencia se han desarrollado Sigfox y LoRa [65].

3.7.2 Análisis comparativo

Tabla 2 Análisis comparativo de tecnologías LPWAN.

Parámetros/Tecnología	LoRa	SigFox	NB-IoT
Modulación	CSS	DBPSK (uplink) GFSK (downlink)	BPSK o QPSK (uplink) QPSK (downlink)

Banda de frecuencia	433/868/780/915 MHz ISM	868/902 MHz ISM	Frecuencias LTE
Ancho de banda	125/250/500 kHz	Ultra narrow band (100 Hz)	200kHz
Rango de cobertura	5km	5km	1km
Tamaño de paquetes	255 bytes	12 bytes	32 bytes
Velocidad de datos (Uplink)	300 bps a 50 kbps	100 bps	62.5 kbps
Velocidad de datos (Downlink)	300 bps a 50 kbps	4 mensajes de 8bytes por día	27.2 kbps
Topología	Estrella	Estrella	Estrella
Organización	Lora Alliance	SigFox	3GPP
Operadores de servicio	Módulos transeptores	Requiere suscripción	Operadores de telefonía móvil

Después del análisis comparativo expuesto en la tabla 2 entre las tecnologías LoRa, Sigfox y NB-IoT para la implementación de una red de monitoreo de consumo eléctrico, se optó por utilizar LoRa debido a varias razones fundamentales. Aunque Sigfox ofrece características atractivas en términos de bajo consumo de energía y costo de dispositivos, su modelo de negocio basado en licencias podría resultar en costos adicionales a largo plazo. Por otro lado, NB-IoT aprovecha la infraestructura celular existente, lo que podría parecer conveniente, pero puede estar limitado por la cobertura de la red celular y los costos asociados. LoRa, en contraste, ofrece una arquitectura de red abierta y descentralizada, lo que proporciona flexibilidad y escalabilidad sin depender de infraestructuras existentes ni incurrir en costos de licencia significativos.

En última instancia, la elección de LoRa se basó en su combinación de costo efectivo, autonomía y capacidad para superar los desafíos específicos del entorno de monitoreo de consumo eléctrico.

3.8 Diseño del subsistema de comunicaciones

Después de examinar detenidamente las principales tecnologías LPWAN, la decisión de implementar LoRa se basa en sus notables características y su accesibilidad. LoRa, que significa "Long Range" o largo alcance, destaca por varias razones:

- Ofrece una cobertura considerable, permitiendo la comunicación eficaz a largas distancias de hasta unos cuantos kilómetros.
- Una de las principales fortalezas es su eficiencia energética. Los dispositivos pueden operar con baterías de larga duración
- La tecnología es conocida por su capacidad para penetrar paredes y otros obstáculos, lo que la hace adecuada para entornos urbanos y edificaciones donde las señales deben atravesar estructuras.
- Opera en una porción del espectro electromagnético destinada a aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM), por lo tanto, es de uso no licenciado.

- Utiliza módulos transceptores para la comunicación inalámbrica. Estos módulos integran tanto la función de transmisión (TX) como la función de recepción (RX) en un solo dispositivo.

3.8.1 Arquitectura del subsistema de comunicaciones

Para definir la arquitectura del subsistema se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Se realizará el monitoreo del consumo eléctrico de dos viviendas que se encuentran separadas a cierta distancia, las viviendas pueden o no tener el servicio de acceso a internet, entonces, la tecnología inalámbrica seleccionada es la adecuada ya que me permite la transmisión de datos a larga distancia hacia un nodo central o Gateway el mismo que tendrá conectividad a internet.
- Cada módulo LoRa funciona como transceptores por lo que se puede establecer 1 o más Gateways, sin embargo, la red no es muy extensa por lo cual solo contamos con un Gateway y dos dispositivos finales, de esta forma la red a implementarse tendrá una topología en estrella y con la posibilidad de escalamiento en la red.

En este sentido, la arquitectura de la red con tecnología LPWAN permite realizar el despliegue de la red de monitoreo, de acuerdo a la figura 12 su estructura incluye los siguientes elementos:

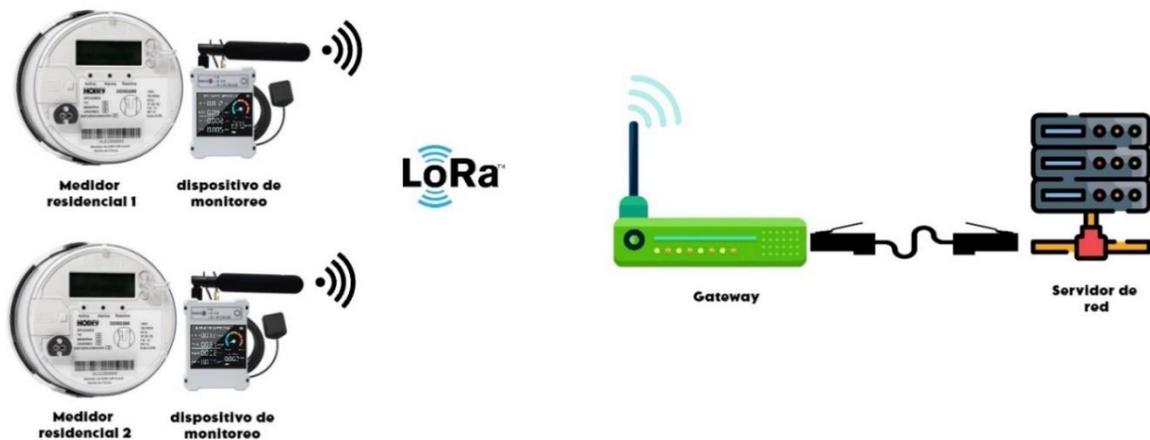


Figura 12 Subsistema de comunicación.

Dispositivos finales, están diseñados para recopilar información proporcionada por los sensores y transmitirla al Gateway, además de ser eficientes en cuanto al consumo de energía, el dispositivo final se ubicará a una distancia considerable del nodo central, en cuanto a su implementación se la realiza junto al medidor residencial, el subsistema electrónico de medición utiliza sensores no invasivos, por lo tanto, facilita su instalación.

Gateway, su principal objetivo consiste en recibir la información proveniente de los nodos finales de la red LoRa y dirigirla a un servidor de red. Es decir, su función principal es actuar como interfaz entre la red LoRa y una red TCP/IP. El gateway facilita la

comunicación al recibir los datos de los dispositivos finales y transmitirlos de manera eficiente a través de la infraestructura de red, permitiendo así la conexión y la gestión de la información en una red más amplia.

Servidor de red y aplicaciones, gestiona aspectos como la autorización y la gestión de dispositivos, mientras que las aplicaciones se centran en la interfaz con el usuario, la integración con sistemas más amplios y el análisis de datos para extraer información significativa de la red LoRa. Estos elementos trabajan en conjunto para proporcionar una solución completa y eficiente para aplicaciones específicas de monitoreo.

3.8.2 Diseño de la red y sus componentes

Como se muestra en la figura 13 la red se compone de dos nodos finales responsables de la transmisión de la información recolectada por los sensores. En la etapa de configuración se establece un intervalo de tiempo para la transmisión de datos, teniendo en cuenta la congestión de paquetes. La configuración de la red sigue un esquema en forma de estrella, en el cual cada nodo está directamente conectado a un único punto central.

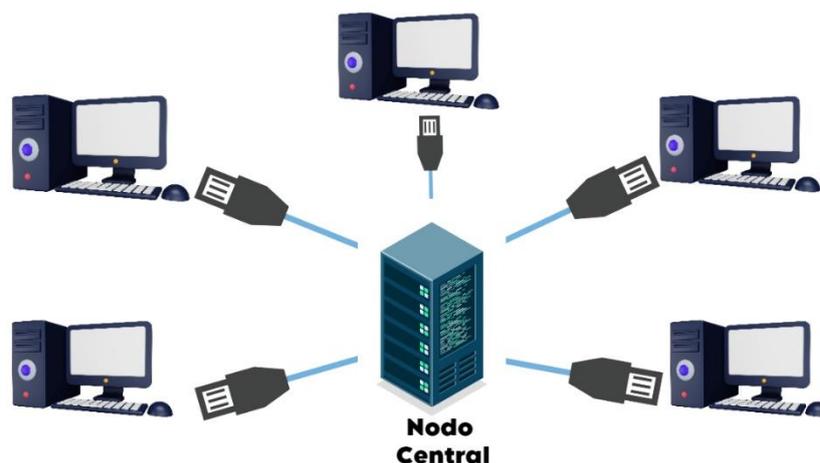


Figura 13 Topología de red en estrella.

Además, la red es escalable, lo que significa que puede expandirse fácilmente para incluir más nodos o dispositivos según las necesidades futuras. Esta capacidad de escalabilidad proporciona flexibilidad y adaptabilidad a medida que la red crece, permitiendo que se agreguen nuevos elementos sin interrumpir el funcionamiento general del sistema.

3.8.3 LILYGO® TTGO T-Beam V1.1 LoRa 868 MHz

Se utilizaron los siguientes componentes teniendo en cuenta la disponibilidad de hardware y costos para su implementación. La TTGO T-Beam V1.1 LoRa 868/915 MHz es una placa fabricada por LILYGO, una empresa conocida por producir una amplia gama de placas de desarrollo y módulos electrónicos para proyectos de IoT y comunicación inalámbrica. Es un módulo de radio avanzado que utiliza la tecnología LoRa para facilitar la comunicación inalámbrica en redes de malla. Gracias a su arquitectura robusta en cuanto a

hardware y software, proporciona una solución versátil y de última generación para una variedad de aplicaciones [66].

Según se evidencia en la figura 14, la placa TTGO T-Beam V1.1 está diseñada en torno al microcontrolador ESP32 de Espressif Systems, que es conocido por su potencia y versatilidad. Además del ESP32, esta placa incluye un transceptor LoRa SX1276, que permite la comunicación de largo alcance a frecuencias como 868 MHz de la banda de frecuencias ISM, en la tabla 3 se muestran sus especificaciones.

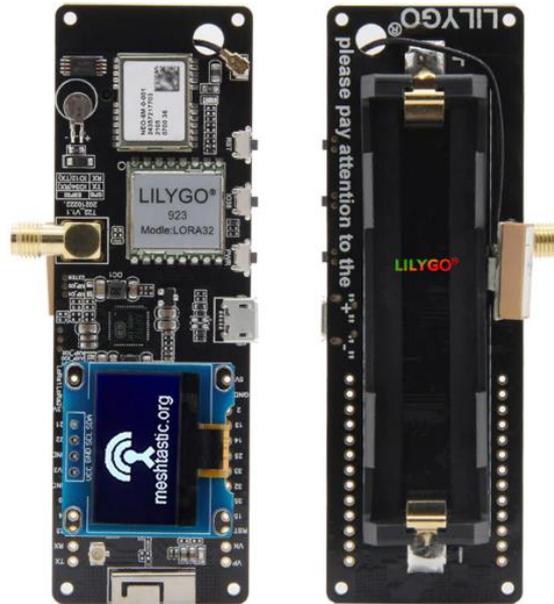


Figura 14 Tarjeta LILYGO® TTGO T-Beam V1.1 [66].

Tabla 3 Especificaciones de LILYGO® TTGO T-Beam V1.1 [66].

ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE	
MCU	ESP32
Flash	4MB
PSRAM	8 MB
Protocolo inalámbrico	Wi-Fi + Bluetooth 4.2
LoRa	SX1276
GPS	NEO-6M
USB-Port	Micro-USB
Funciones integradas	3 botones (Encendido + IO38 + Reset)
Antena	<ul style="list-style-type: none"> • Antena WiFi 3D [Usar por defecto] • Antena LoRa • Antena cerámica GPS

Algunas características clave de la LILYGO® TTGO T-Beam V1.1 LoRa 868 MHz:

Transceptor LoRa SX1276: El SX1276 es un chip de Semtech que proporciona capacidades de comunicación de largo alcance. La tabla 4 muestra a detalle las características específicas del componente.

Tabla 4 Especificaciones modulo LoRa [66].

Transmisor/Receptor LoRa	
Chipset	SX1276
Interfaz	SPI
Sensibilidad	-148 dBm
Velocidad de transferencia	300 kbps
Frecuencia	868 MHz
Voltaje de funcionamiento	1.8-3.7V

GPS integrado: La placa generalmente incluye un módulo GPS integrado, lo que permite obtener información de ubicación, en la tabla 5 se detallan sus características.

Tabla 5 Especificaciones modulo GPS

GPS	
Chipset	NEO-6M
Voltaje de funcionamiento	3 – 5v
Velocidad de transmisión estándar	9600

Gestión de batería: La placa generalmente cuenta con circuitos de gestión de batería integrados que regula el consumo según su estado como lo muestra la tabla 6, lo que permite alimentarla con una batería recargable, por lo tanto, permite la movilidad del dispositivo.

Tabla 6 Gestión de batería

GESTIÓN DE BATERIA	
Consumo de energía	120mA + 20 dBm, 90mA + 17 dBm, 29mA + 13 dBm
Consumo de energía en espera	0.2uA SLEEP, 1.5uA IDLE

Programable mediante Arduino IDE: Se puede programar el ESP32 integrado en la tarjeta de desarrollo utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE como muestra la figura 15, lo que facilita el desarrollo para muchos usuarios.



Figura 15 Tarjeta programable con Arduino IDE.

3.9 Diseño del subsistema electrónico de medición

Para diseñar el subsistema propuesto, es importante tener en cuenta la función y la integridad de la acometida de medición residencial, que es el punto de conexión entre la red eléctrica pública y la instalación eléctrica doméstica. Esta acometida consta de conductores, dispositivos de protección y el medidor eléctrico en sí mismo, que registran el consumo de energía de la vivienda.

Por otro lado, la modificación del medidor residencial instalado por la compañía eléctrica está estrictamente prohibida y podría resultar en sanciones para el usuario, es esencial encontrar una solución que no interfiera con este equipo. Por lo tanto, el diseño del prototipo debe ser no invasivo y no necesitar ninguna alteración en el sistema existente.

Para cumplir con este parámetro, el proyecto propone el uso de un sensor no invasivo que pueda recopilar datos de consumo eléctrico sin necesidad de intervenir en el cableado del medidor o del panel eléctrico de la vivienda. Es por ello que, se empleara sensores de corriente de efecto Hall, el cual es un método bastante conocido y sencillo de instalar. Al colocarlo en el cable que lleva la corriente eléctrica, este sensor puede generar una señal de voltaje en respuesta al campo magnético producido por la corriente. Esta señal de voltaje es directamente proporcional a la intensidad de la corriente que fluye a través del cable [67]. De esta forma, dado que no existe una conexión eléctrica directa no compromete nuestra seguridad, sin embargo, es necesario tener medidas cautelares ante la manipulación de estos dispositivos.

Además, de acuerdo a lo mostrado en la figura 16, el subsistema propuesto incluye un contactor que puede controlar el flujo de corriente hacia la instalación eléctrica de la vivienda. Este contactor permitirá habilitar o deshabilitar el suministro eléctrico de manera remota.

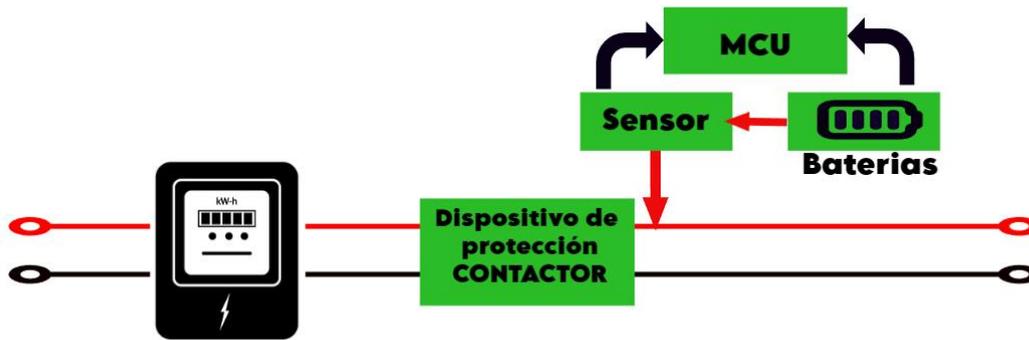


Figura 16 Diseño del subsistema de medición.

3.9.1 Componentes

Contactor: El contactor que se muestra en la figura 17, se colocará en línea con el cable de alimentación principal que entra al panel eléctrico. Este dispositivo permitirá controlar el flujo de corriente hacia la instalación eléctrica de la vivienda. Se activará o desactivará según sea necesario para cortar el suministro de electricidad. Esto puede ser útil para implementar funciones como el control remoto del suministro eléctrico o la gestión de la demanda energética.



Figura 17 Contactor eléctrico [68].

Una vez que se haya identificado el dispositivo encargado del corte y la reconexión del suministro eléctrico, resulta de suma importancia estimar el consumo que se va a tener en dicho circuito (cálculo de potencias). Esta estimación permitirá seleccionar el dispositivo correspondiente con el valor de corriente que pueda soportar.

Tabla 7 Cálculo de potencias de una vivienda promedio.

Cálculo de potencias						Factor de Demanda	Potencia Demandada	P(A)	P(B)
Circuito	Cantidad	Potencia c/u[W]	Potencia total [W]	Corriente [A]	Interrupcion TM				
Lm1 (Luminarias)	10	80	800	6,7	1x15	0,70	560,0		560,0
Lm2 (Luminarias)	11	80	880	7,3	1x15	0,70	616,0	616,0	
Lm3 (Luminarias)	6	80	480	4,0	1x15	0,70	336,0		336,0
Lm4 (Luminarias)	10	80	800	6,7	1x15	0,70	560,0	560,0	
F1 (Tomacorrientes)	8	200	1.600	13,3	1x20	0,50	800,0		800,0
F2 (Tomacorrientes)	11	200	2.200	18,3	1x20	0,50	1.100,0	1.100,0	
F3 (Tomacorrientes)	11	200	2.200	18,3	1x20	0,50	1.100,0		1.100,0
F4 (Tomacorrientes)	8	200	1.600	13,3	1x20	0,50	800,0	800,0	
CE1 (Cocina de inducción)	1	6.000	6.000	31,3	2x30	0,65	3.900,0	3.900,0	3.900,0
CE2 (Cocina de inducción)	1	6.000	6.000	31,3	2x30	0,65	3.900,0	3.900,0	3.900,0
Pot_Instal			22.560	Pot_Demand			13.672,0		

Una vez realizados los cálculos como se muestra en la tabla 7, el dispositivo estará capacitado para detectar y cortar el suministro eléctrico en caso de producirse un cortocircuito u otro percance en la línea. Es esencial asegurar que el dispositivo de protección esté adecuadamente dimensionado para la carga eléctrica anticipada, garantizando así la seguridad del sistema eléctrico y de los usuarios del mismo.

En el proceso de cálculo, se considera el número de circuitos para luminarias, circuitos de fuerza y circuitos especiales. Cada uno de estos circuitos tiene una potencia aproximada de consumo, y al sumarlas se obtiene la potencia total en el circuito. Utilizando la fórmula Pot/V , se calcula la corriente necesaria. Una vez que se tiene este valor, se puede seleccionar el contactor adecuado para el circuito. Este procedimiento permite dimensionar correctamente el sistema eléctrico, garantizando que los componentes seleccionados puedan manejar la carga eléctrica de manera segura y eficiente.

3.9.2 Sensor no invasivo PZEM-004T-100A

Este sensor se instalará alrededor de uno de los cables de alimentación principales que ingresan al panel eléctrico de la vivienda. Utilizará tecnología no invasiva, como sensores de corriente de efecto Hall, para medir la corriente que fluye a través del cable sin necesidad de cortarlo o modificarlo de ninguna manera. Esto garantiza que no se realicen cambios en el medidor eléctrico residencial existente.

Como se muestra en la figura 18 presenta un diseño modular lo cual permite reducir el espacio en el equipo, en comparación con otros sensores en el mercado el sensor PZEM-004T-100A tiene la capacidad de medir corriente RMS, voltaje RMS y potencia activa tomada de una línea monofásica de 110 V y 220 V.



Figura 18 Sensor PZEM-004T-100A [69].

Es un dispositivo ampliamente utilizado, especialmente en aplicaciones donde se requiere monitorear el consumo de energía. Su capacidad permite un desempeño en proyectos de automatización del hogar, sistemas de gestión de energía, monitoreo de equipos industriales. Además, ofrece una buena precisión en las mediciones, lo que lo hace confiable para aplicaciones donde se requiere un monitoreo preciso del consumo, las características detalladas se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8 Rangos y formatos de medida del sensor.

Rangos de medida	
Potencia (0 a 22kW)	0 a 10kW – formato: 0.000 a 9.999
	10 a 22kW – formato: 10.00 a 22.00
Energía (0 a 9999kWh)	0 a 10kWh – formato: 0.000 a 9.999
	10 a 100kWh – formato: 10.00 a 99.99
	100 a 1000kWh – formato: 100.0 a 999.9
	1000 a 9999kWh – formato: 1000 a 9999
Voltaje (80 a 260VAC)	Formato 110.0 ~ 220.0.
Corriente (0 a 100A)	Formato 00.00 a 99.99

3.9.3 Pantalla Nextion Nx8048t050 5 Pulgadas

Es una excelente solución para la interfaz hombre-máquina (HMI). Esto se debe a que proporciona una interfaz de control y visualización que facilita la interacción entre un usuario y un proceso, con su pantalla táctil permite una entrada precisa y sensible al tacto.



Figura 19 Pantalla Nextion Nx8048t050 5 Pulgadas.

Además, cuenta con una memoria Flash de 16MB, lo que le permite almacenar una cantidad considerable de datos y contenido para su visualización. También ofrece comunicación a través de puerto serial, lo que facilita la integración con otros dispositivos y sistemas [70].

La figura 19 muestra el diseño de la pantalla con una diagonal de 5 pulgadas (133.5 mm x 84 mm), proporciona un área visual adecuada para mostrar información de manera clara. Además, tiene una resolución de 800x480 píxeles, lo que permite una visualización nítida de gráficos y texto, la tabla 9 muestra sus especificaciones.

Tabla 9 Especificaciones Pantalla Nextion Nx8048t050 5'' [70].

Características y especificaciones	
Voltaje de operación	Entre 4.75V y 7V (recomendado usar a 5V)
Corriente de operación	100% de brillo: 410mA Modo Sleep: 15 mA
Memoria Flash	16 MB
Memoria RAM	3584 byte
Interfaz	4 pines (+ 5V, TX, RX, GND)
Puerto Serial	TTL
Puerto SD	Formato FAT32 , Micro SD 32G máximo
Temperatura de operación	Entre -20°C y 70°C

3.10 Modelado 3D del sistema de alojamiento de componentes

El proceso de diseño del sistema de alojamiento en SolidWorks y su posterior impresión en 3D implica una serie de pasos meticulosos. En primer lugar, se recopilan todos los requisitos y especificaciones necesarios para el sistema, teniendo en cuenta las dimensiones de espesor del modelo además de tomar medidas de los componentes que se van a alojar dentro de la pieza y sus respectivos soportes. Luego, utilizando las herramientas de modelado sólido de SolidWorks, se diseñan las piezas individuales del sistema, asegurándose de que cumplan con los requisitos establecidos y encajen correctamente entre sí. Una vez que todas las piezas han sido diseñadas, se procede al ensamblaje del sistema,

ajustando las relaciones de ensamblaje según sea necesario, la figura 20 muestra el diseño final de la carcasa para transmisores.



Figura 20 Sistema de alojamiento para transmisores.

Previo a llevar a cabo la impresión, es crucial que se realice una simulación exhaustiva del ensamblaje completo del modelo como se muestra en la figura 21. Se destaca la importancia de tener en cuenta que la tapa delantera deberá estar hecha de un material distinto, permitiendo así su remoción en caso de ser necesario ajustar los circuitos eléctricos alojados en su interior. Además, se debe dimensionar la pantalla de manera adecuada para garantizar un sellado perfecto, sin que sobresalga ni deje espacios entre las piezas.

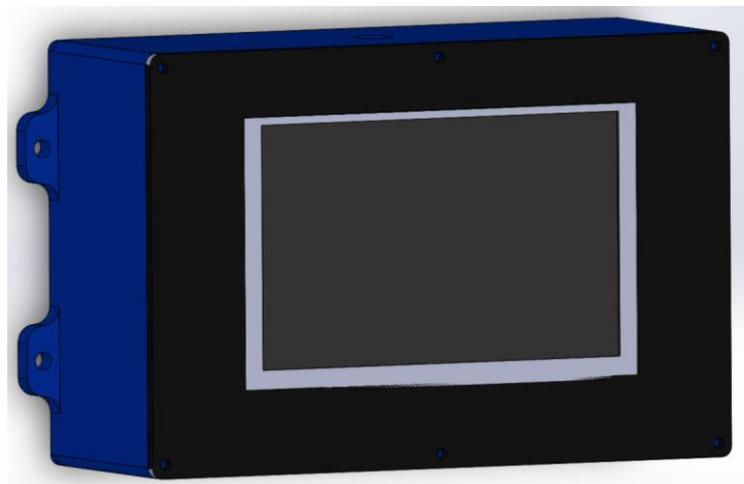


Figura 21 Modelado 3D de transmisores.

En el diseño del receptor, la carcasa se reduce considerablemente debido a la ausencia de circuitos en su interior. Consiste principalmente en la tarjeta de desarrollo, antena, cuatro botones y una pantalla de tamaño reducido que indicará la conexión con los transmisores. Para lograr un diseño, es necesario modelar la pantalla con las dimensiones reales, como se observa en la figura 22, de esta forma estimar la apertura adecuada para que encaje perfectamente en la tapa delantera.

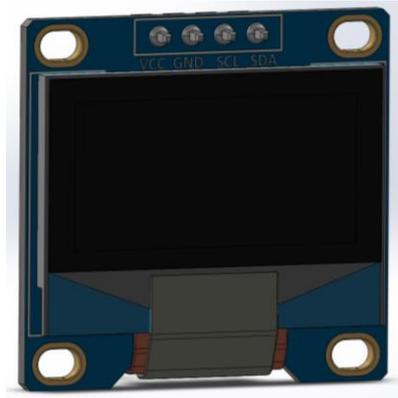


Figura 22 Modelo 3D de la pantalla del receptor.

El diseño final de la carcasa para el receptor se exhibe en la figura 23. Se destaca que, dado que el dispositivo es responsable de recibir todos los datos transmitidos desde los nodos finales, es imperativo que se ubique a una altura considerable para garantizar una óptima recepción de señal y funcionamiento del sistema. Por ende, podría requerir un soporte adicional, según sea necesario. Además, se ha prestado especial atención al diseño de la carcasa para asegurar el acceso y administración del dispositivo, así como para permitir una interacción cómoda con los botones y la pantalla del receptor. Esto asegura una experiencia de usuario óptima y facilita cualquier posible mantenimiento o ajuste que pueda ser necesario.

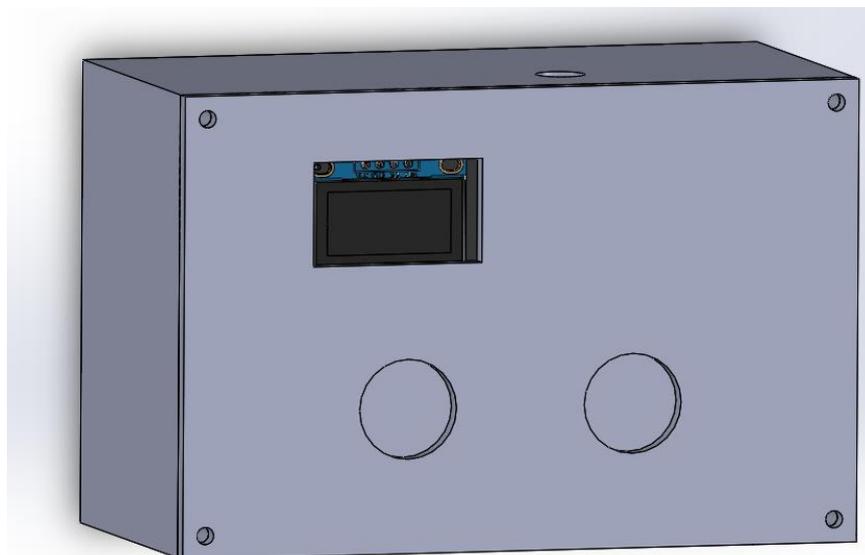


Figura 23 Modelo 3D del receptor.

3.11 Selección de plataforma web

Una vez que el prototipo esté en funcionamiento, es crucial configurar el Gateway para que envíe los datos recopilados hacia un servidor en red. Este servidor será responsable de alojar los resultados de las mediciones y permitir su visualización por parte de los usuarios.

La configuración del Gateway implica establecer la comunicación adecuada con el servidor en red. Esto puede incluir la configuración del dispositivo a internet, puertos de

comunicación y protocolos de transferencia de datos para garantizar una transmisión segura y confiable. Además de simplemente enviar datos al servidor, es importante considerar cómo se almacenarán y presentarán estos datos a los usuarios. El servidor en red deberá tener la capacidad de gestionar grandes volúmenes de datos de manera eficiente y ofrecer herramientas de visualización y análisis para que los usuarios puedan interpretar fácilmente la información recopilada.

En esta etapa de configuración, es indispensable examinar las distintas plataformas disponibles y seleccionar la más adecuada para el proyecto. Esta plataforma debe ser fácil de usar para los usuarios finales y capaz de manejar grandes volúmenes de datos, además de garantizar la integridad de la información recopilada. Algunos aspectos clave a considerar durante esta fase incluyen:

Características y funcionalidades: debe tener la capacidad de crear interfaces de usuario intuitivas, integración con diferentes tipos de dispositivos y la disponibilidad de herramientas de análisis de datos.

Personalización: Se evalúa la capacidad de personalización de la plataforma para adaptarse a las necesidades específicas del proyecto. Esto puede incluir personalizar la apariencia de la interfaz de usuario y escalar el sistema según sea necesario.

Integraciones y compatibilidad: Es importante verificar si la plataforma es compatible con los dispositivos y tecnologías existentes que se utilizarán en el sistema de monitoreo. Además, se deben considerar las integraciones con servicios y aplicaciones.

Costo: Accesibilidad de costos de la plataforma, incluyendo cualquier tarifa inicial, costos de mantenimiento y posibles cargos adicionales por características premium o uso excesivo de recursos.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se eligió la plataforma Blynk por su compatibilidad con la tarjeta de desarrollo TTGO T-Beam V1.1, Arduino, Raspberry Pi, ESP32 además brinda la capacidad de ejecutar aplicaciones con sistemas operativos iOS y Android [70].

La interfaz utilizada para el proyecto facilita la navegación y el acceso a sus funciones. Esta interfaz, tal como se muestra en la figura 24, está diseñada para ser intuitiva y fácil de usar. Adicional a ello la plataforma web, tiene la capacidad de manejar eficientemente grandes volúmenes de datos, lo que permitirá a los usuarios y administrador trabajar con información compleja sin problemas de rendimiento o velocidad.

Una de las características destacadas de Blynk es su capacidad para generar reportes en diferentes lapsos de tiempo según las necesidades del usuario. Esto proporciona flexibilidad y conveniencia para analizar datos históricos o en tiempo real según sea necesario.

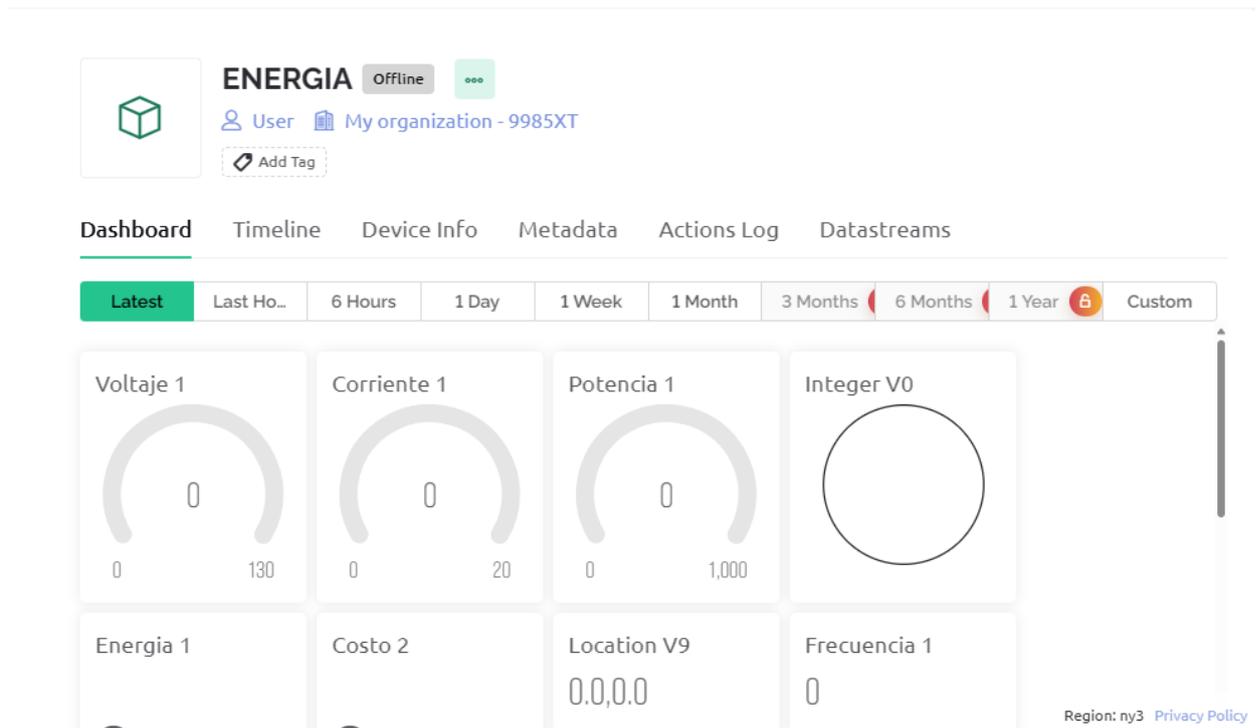


Figura 24 Diseño de la interfaz de Blynk para el monitoreo de datos.

Además, la plataforma web proporciona una aplicación móvil que se encuentra disponible tanto para dispositivos Android como iOS. Como se muestra en la figura 25 la aplicación permite a los usuarios acceder a la plataforma desde sus teléfonos inteligentes o tabletas, lo que garantiza una disponibilidad inmediata para monitorear variables o verificar el funcionamiento en cualquier momento y desde cualquier lugar. Esto brinda una mayor flexibilidad y conveniencia a los usuarios, ya que no están limitados por la ubicación física para acceder a la información y tomar decisiones importantes.

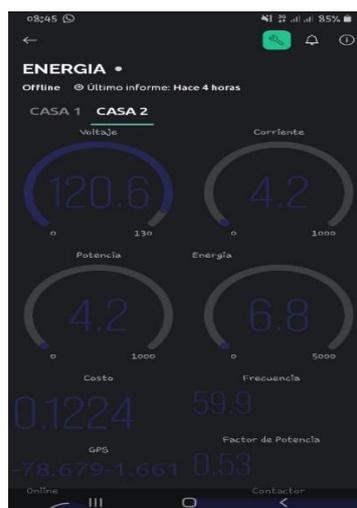


Figura 25 Aplicación móvil de Blynk.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Implementación del prototipo

Tras completar la fase de diseño, se procede a llevar a cabo el ensamblaje de los componentes y subsistemas. Este proceso implica la unión de las partes individuales diseñadas previamente para formar el producto final. Durante el ensamblaje, se verifica que cada componente se ajuste correctamente y se integre de manera adecuada con los demás para garantizar el correcto funcionamiento del sistema en su conjunto. Este paso es crucial para convertir el diseño conceptual en un producto tangible y funcional.

4.2 Ensamblaje de la placa principal

La figura 26 muestra el diseño del PCB (Placa de Circuito Impreso), que será responsable de albergar todos los componentes necesarios. Destacando como elemento principal la tarjeta de desarrollo TTGO, que será la encargada de llevar a cabo todos los procesos una vez que se haya cargado el software necesario. Esta tarjeta de desarrollo actúa como el núcleo del sistema, coordinando y ejecutando las funciones requeridas para el funcionamiento del dispositivo. El diseño del PCB se ha realizado considerando esta tarjeta como elemento central, asegurando una disposición eficiente y adecuada de los demás componentes en la placa.

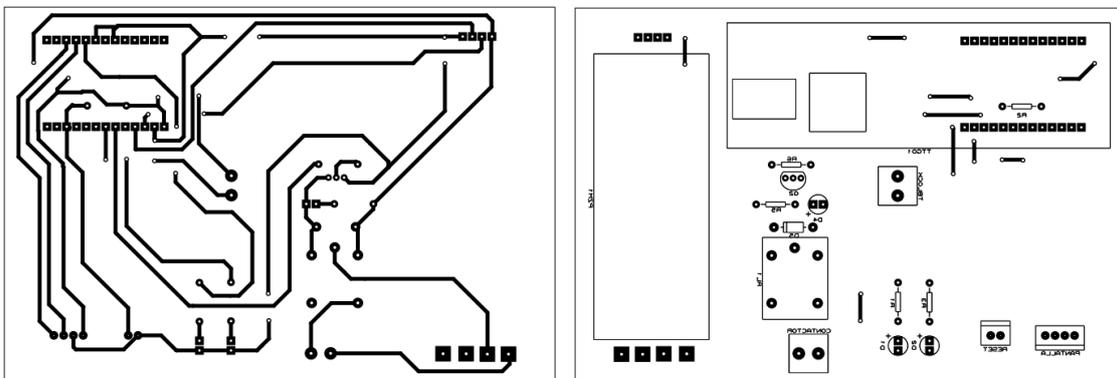


Figura 26 Diseño placa PCB.

Una vez que la placa PCB ha sido impresa, procedemos con precaución a la colocación de todos los componentes, asegurándonos de verificar las polaridades y la orientación correcta de los pines, especialmente en lo que respecta a la tarjeta de desarrollo. Tal como se ilustra en la figura 27 una vez que se completa el ensamblaje.

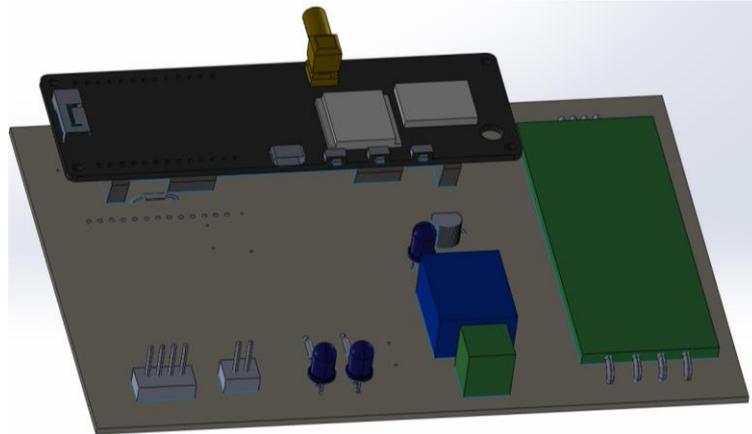


Figura 27 Placa principal ensamblada.

4.3 Implementación del diseño de transmisores

Una vez completado el diseño del sistema de alojamiento necesitamos imprimir los diseños para ello la impresión de un modelo 3D implica varios pasos detallados. Primero, preparamos el archivo para impresión, lo que implica ajustar el tamaño, la orientación y agregar estructuras de soporte si es necesario. Después, seleccionamos el material de impresión adecuado, en nuestro caso usaremos filamentos de plástico para luego configurar los parámetros de impresión, como la temperatura y la velocidad. Una vez que todo esté listo, ejecutamos el proceso de impresión, durante el cual la impresora 3D construye el modelo capa por capa. Es importante supervisar el proceso para detectar y corregir cualquier problema. Después de la impresión, se realiza el post-procesamiento, que puede incluir la eliminación de estructuras de soporte, el lijado para suavizar superficies ásperas y la aplicación de acabados como la pintura o el pulido. Finalmente, revisamos el modelo impreso como se observa en la figura 28 para garantizar su calidad y uso.



Figura 28 Transmisor ensamblado.

4.4 Implementación del receptor

El receptor o gateway LoRa representa el núcleo vital de la red debido a su posición central en una topología en estrella. Dado que cualquier fallo en este dispositivo puede comprometer toda la red. Por esta razón, se requiere una cuidadosa planificación de su ubicación, su instalación se realizará en un lugar estratégico, preferiblemente con una

elevación considerable y con una vista despejada, lo que optimiza su capacidad para recibir las señales de los nodos remotos y garantiza la eficiencia y fiabilidad del sistema en su conjunto.

Dado que el receptor LoRa opera como el nodo central en la red, se ha optimizado su diseño para minimizar la carga de procesamiento. Su función principal radica en recibir la información proveniente de los transmisores y transmitirla a la red. Por lo tanto, se han reducido al mínimo los procesos adicionales que se ejecutan en él. La figura 29 ilustra el diseño físico del receptor, que se ha simplificado para adaptarse a este propósito específico.



Figura 29 Receptor ensamblado.

4.5 Instalación de componentes

Para instalar los equipos adecuadamente, es esencial considerar ciertos parámetros, ya que la colocación del sensor puede tener implicaciones en la seguridad de las personas. Por lo tanto, se deben tomar precauciones al manipular los cables del medidor residencial. Una vez que hemos identificado la fase del medidor, podemos proceder con la instalación, tal como se ilustra en la figura 30. Sin embargo, el sensor es de tipo no invasivo, lo que facilita su colocación, ya que solo se lo instala alrededor del cable, la conexión al equipo transmisor es simple como conectar con un socket directamente al equipo.



Figura 30 Instalación del sensor PZEM-004T-100A.

Una vez que el sensor ha sido instalado correctamente, podemos avanzar con la instalación del contactor que se ilustra en la figura 31. Es esencial llevar a cabo este proceso con extrema precaución y asegurarnos de haber deshabilitado el flujo de energía desde el termomagnético principal. Después de identificar la fase y el neutro, procedemos a conectar el contactor de manera segura. Es importante ubicarlo en un lugar protegido y aislado para prevenir cualquier riesgo eléctrico. Siguiendo estas medidas de seguridad, podemos garantizar una instalación libre de peligros.



Figura 31 Instalación del contactor.

En cuanto a la alimentación del transmisor, contamos con un diseño autónomo que utiliza baterías, lo que proporciona flexibilidad en la ubicación del equipo. Además, disponemos de una entrada de corriente alterna que puede conectarse a cualquier toma de corriente estándar de 110V para garantizar un suministro continuo de energía cuando sea necesario. Esta versatilidad en las opciones de alimentación asegura un funcionamiento fiable y continuo del equipo en diversas situaciones y entornos, la figura 32 muestra la instalación total del equipo.



Figura 32 Instalación completa del transmisor.

4.6 Instalacion y configuracion del receptor

La instalación del gateway, tal como se muestra en la figura 33, resulta ser bastante sencilla. En el software correspondiente, simplemente se introducen las credenciales de la red WiFi. Esto habilita la transferencia de datos hacia la red, lo que a su vez posibilita visualizar la información en la plataforma web designada.

La ubicación del receptor es crítica para un rendimiento óptimo. Debe situarse en un lugar con una altura considerable y en un entorno despejado para evitar cualquier obstrucción entre el transmisor y el receptor. Esta disposición garantizará una comunicación eficiente y fiable entre los dispositivos.

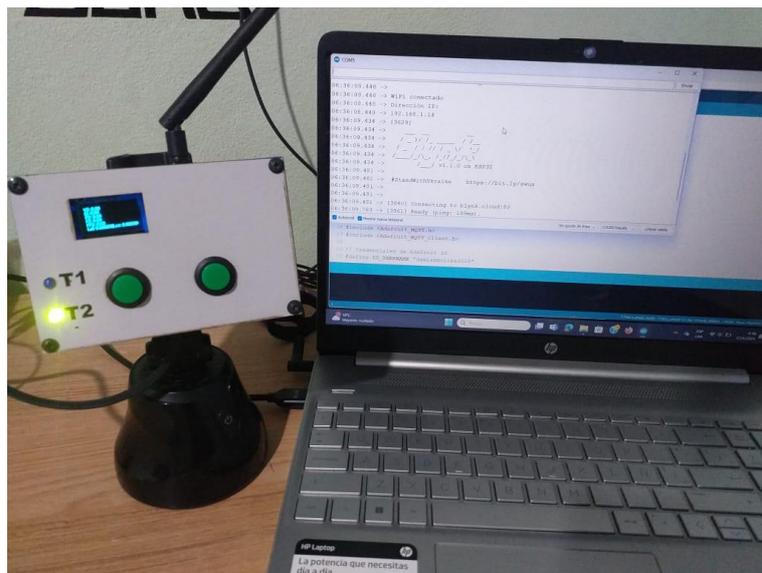


Figura 33 Instalación del receptor.

4.7 Visualización de datos

Para la visualización de los datos utilizamos la plataforma Blynk la misma que cuenta con una interfaz gráfica para el usuario a más de tener disponible una aplicación móvil disponible en cualquier tienda de aplicaciones móviles. Además, la plataforma cuenta con la capacidad de almacenar los datos en el tiempo que el administrador crea necesario y adicional a ello podemos descargarlo directamente desde la plataforma en un archivo .csv que es compatible con Excel u otro software de análisis de datos, en la figura 34 se muestra la base de datos proporciona por la plataforma web.

Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7
Time	Corriente 1	Corriente 2	Voltaje 1	Voltaje 2	Potencia 1	Potencia 2
03/26/24 07:00:00 PM	1,93	0	119,40	0	188,29	0
03/26/24 06:00:00 PM	1,82	0	115,09	0	176,50	0
03/26/24 05:00:00 PM	1,51	0	113,68	0	145,46	0
03/26/24 04:00:00 PM	1,31	0	112,64	0	124,47	0
03/26/24 03:00:00 PM	1,55	0	114,74	0	147,16	0
03/26/24 02:00:00 PM	1,58	0	115,32	0	149,68	0
03/26/24 01:00:00 PM	1,56	0	115,59	0	157,46	0
03/26/24 12:00:00 PM	1,07	0	115,46	0	95,58	0
03/26/24 11:00:00 AM	1,28	0	113,69	0	111,31	0
03/26/24 10:00:00 AM	0,65	0	114,32	0	62,44	0
03/26/24 09:00:00 AM	0,86	0	114,65	0	78,37	0
03/26/24 08:00:00 AM	1,09	0	114,14	0	98,44	0
03/26/24 07:00:00 AM	1,563	0	98,25	0	166,02	0
03/24/24 10:00:00 PM	3,86	2,24	114,59	114,59	406,33	178,26
03/24/24 09:00:00 PM	3,84	2,24	113,92	113,86	401,48	170,04
03/24/24 08:00:00 PM	3,38	1,66	119,53	119,43	363,93	134,87
03/24/24 07:00:00 PM	4,24	2,38	116,54	116,58	458,48	201,13
03/24/24 06:00:00 PM	3,21	1,17	113,23	113,59	334,76	98,40

Figura 34 Tabla de datos descargado de Blynk.

4.8 Pruebas y validación

Para validar el prototipo, realizamos varias mediciones en las que evaluamos la calidad de la señal, representada por el RSSI, como nuestra variable dependiente, y la distancia como variable independiente. Realizamos un total de 36 mediciones, cada una a distancias diferentes que variaban desde los 15 metros hasta aproximadamente 2 kilómetros. Las mediciones se representan en las figuras 37-38, donde se puede visualizar claramente las distintas mediciones realizadas en diferentes distancias.

4.8.1 Pruebas de transmisión a diferentes distancias

En las primeras transmisiones, se evaluaron distancias desde 15 hasta 40 metros. Durante estas pruebas, se observó que los valores de RSSI se mantuvieron en un rango considerado como excelente, como se muestra en la figura 35. Esto sugiere que la calidad de la señal se mantuvo sólida y confiable a lo largo de estas distancias, lo cual es un indicativo positivo para el desempeño del sistema de transmisión en esas condiciones.

```

17:42:10 --> :59.90,FP:0.71,Lat:-1.310408, Lon:-78.727158,
17:42:10 --> RSSI: -66
17:42:10 --> Paquete recibido:
17:42:10 --> ID2:,V:116.00,I:0.02,P:1.80,E:15.58,F
17:42:12 --> :60.00,FP:0.71,Lat:-1.310408, Lon:-78.727158,
17:42:12 --> RSSI: -67
17:42:12 --> Paquete recibido
17:42:14 --> :
17:42:14 --> ID2:,V:116.10,I:0.02,P:1.80,E:15.58,F:60.00,FP:0.70,Lat:-1.310408, Lon:-78.727158,
17:42:14 --> RSSI: -67
17:42:14 --> Paquete recibido:
17:42:14 --> ID2:,V:116.00,I:0.02,P:1.80,E:15.58,F:60.00,FP:0.71,Lat:-1.310408, Lon:
17:42:18 --> -78.727158,
17:42:18 --> RSSI: -66
17:42:18 --> Paquete recibido:
17:42:18 --> ID2:,V:116.00,I:0.02,P:1.80,E:15.58,F:60.00,FP:0.71,Lat:-1.310408, Lon:-7
17:42:24 --> 8.727150,
17:42:24 --> RSSI: -65

```

Figura 35 Formato de recepción de paquetes.

4.8.2 Mediciones realizadas de 250m hasta 600m

Con una distancia de referencia de 300 metros entre el transmisor y el receptor, comenzamos a enviar paquetes para evaluar la transmisión. Durante este proceso, se observó una variación en los valores de RSSI. Todos estos datos serán monitoreados y registrados desde el receptor para analizar la estabilidad y calidad de la señal en esta distancia específica.



Figura 36 Transmisión a 300m.

Tabla 10 Resultados de transmisión de 250m hasta 600m.

Resultados de transmisión			
Distancia [m]	RSSI [dBm]	% P. perdidos	%P. exitosos
250	-76,50	20	80
300	-76,40	0	100
350	-68,80	0	100
400	-73,75	20	80
450	-77,57	0	100
470	-73,71	0	100
500	-79,43	0	100
520	-83,75	20	80

540	-80,25	20	80
600	-86,67	14	85,71

4.8.3 Mediciones realizadas desde 1km hasta 1,8km aproximadamente.

A una distancia de 1000 metros, la señal tiende a degradarse ligeramente; sin embargo, la transmisión de paquetes se considera estable, ya que solo el 10% de ellos se pierden. Esta pérdida moderada de paquetes es común en comunicaciones de larga distancia y puede atribuirse a factores como la atenuación de la señal e interferencias. A pesar de la degradación de la señal, el rendimiento general de la transmisión sigue siendo aceptable, lo que demuestra la robustez del sistema de comunicación utilizado.



Figura 37 Transmisión a 1km.



Figura 38 Transmisión a 1800m.

Tabla 11 Resultados de transmisión de 1km a 1,8 km.

Resultados de transmisión			
Distancia [m]	RSSI [dBm]	%P. perdidos	%P. exitosos
1000	-79,86	0	100
1050	-88,50	67	33,33
1100	-84,17	25	75
1150	-95,63	0	100
1200	-94,50	14	85,71
1260	-84,86	30	70
1310	-88,50	20	80
1350	-92,17	25	75
1420	-90,83	40	60
1800	-89,50	20	80

4.9 Resultados estadísticos

Para validar el prototipo, se llevó a cabo un seguimiento del RSSI (Received Signal Strength Indication), una medida de la intensidad de la señal recibida por un dispositivo LoRa, indicando la fortaleza o debilidad de la señal transmitida por otro dispositivo. Este enfoque permitió estimar con precisión la verdadera cobertura que la tecnología proporciona.

Es así que para la recolección de datos realizamos el monitoreo de la red enviando paquetes desde diferentes distancias que van desde los 15m hasta aproximadamente 2km en los cuales se podrá evidenciar la calidad de la señal, el número de paquetes exitosos y paquetes perdidos durante la transmisión.

4.9.1 Recolección de datos

Para realizar la recolección de datos de manera efectiva, es crucial mantener un seguimiento constante de los nodos finales y más aún del dispositivo central que desempeña el papel de Gateway. Este dispositivo se conecta a una computadora para facilitar la supervisión y recopilación de información en tiempo real. Utilizando el monitor serial de Arduino IDE, se puede acceder a datos precisos sobre el número de paquetes transmitidos y la calidad de la señal RSSI. Esta configuración permite una observación detallada y en tiempo real del rendimiento de la red LoRa, brindando una visión completa de su funcionamiento.

Los datos serán recopilados desde el Gateway, el cual estará posicionado en una ubicación estática y centralizada. Por otro lado, los nodos finales se distribuirán en diversos lugares, con distancias que varían desde los 15 metros hasta aproximadamente 2 kilómetros. Esta disposición estratégica permitirá no solo medir la calidad de la señal en diferentes distancias, sino también evaluar la capacidad de la red LoRa para mantener una comunicación eficiente y confiable en un entorno real y variado. La amplia gama de distancias contempladas garantizará una evaluación exhaustiva de la cobertura y el rendimiento de la red en condiciones diversas.

4.9.1.1 Interpretación RSSI (Received Signal Strength Indication),

El RSSI en LoRa es una medida de la intensidad de la señal recibida por un dispositivo LoRa. Se considera el indicador más importante para evaluar la calidad de la comunicación inalámbrica, ya que indica cuán fuerte o débil es la señal transmitida por otro dispositivo LoRa.

Medir el RSSI generalmente se realiza utilizando herramientas y software especializados. Una forma común de medir el RSSI es mediante el uso de dispositivos de desarrollo LoRa como en nuestro caso, utilizamos módulos LoRa en la tarjeta TTGO, que estará conectada a una computadora a través de un cable USB. Luego, utilizando el monitor serial del entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino visualizaremos los valores del RSSI en tiempo real mientras los dispositivos LoRa están comunicándose entre sí. Esto se logrará a través del código de programación descrito en la figura 39, que permiten acceder directamente al valor del RSSI, lo que facilita su visualización. Por ejemplo, para Arduino IDE, utilizamos la función `packetRssi()` para obtener el valor del RSSI de los paquetes recibidos.

```
Serial.print("RSSI: ");  
Serial.println(LoRa.packetRssi());
```

Figura 39 Función `packetRssi()`.

En cuanto a si una medida de RSSI es buena o mala, generalmente se considera que un valor más alto de RSSI indica una señal más fuerte y, por lo tanto, una mejor calidad de la señal. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la interpretación exacta puede variar dependiendo de factores como la distancia entre los dispositivos LoRa y la presencia de obstáculos.

En términos generales:

- RSSI entre -30 dBm y -70 dBm: Se considera una señal fuerte y de buena calidad.
- RSSI entre -70 dBm y -90 dBm: La señal es aceptable, pero puede haber cierta degradación en la calidad.
- RSSI por debajo de -90 dBm: La señal es débil y puede experimentar problemas de conexión o pérdida de paquetes.

4.9.2 Base de datos RSSI con respecto a la distancia

Tabla 12 Valor RSSI con respecto a la distancia.

d=15	d=25	d=40	d=50	d=100	d=130	d=150	d=200
-74	-77	-71	-81	-61	-75	-75	-78
-71	-78	-72	-79	-62	-76	-76	-77
-64	-79	-72	-76	-62	-75	-76	-75
-62	-78	-73		-63	-76	-74	-76
-63	-79	-75	-77	-60	-74	-74	-76

-61	-78	-73	-79	-59	-75	-75	-75
-60	-79	-72	-78	-60	-75	-76	-77
-61	-77	-73	-77	-62	-76	-74	
-62	-78	-74	-76	-62	-76	-75	-75
	-79	-73	-77	-61	-74	-75	-76

La tabla 12 presenta un fragmento de los datos recopilados, donde se observa que para cada distancia se transmiten un número determinado de paquetes con el fin de medir el valor de RSSI. Antes de iniciar el análisis estadístico, es crucial graficar la distribución de estos datos. Esto permite determinar si la relación entre la variable dependiente y la variable independiente sigue un modelo lineal o no lineal. La visualización de la distribución de los datos proporciona información crucial para seleccionar el enfoque adecuado en el análisis estadístico subsiguiente.

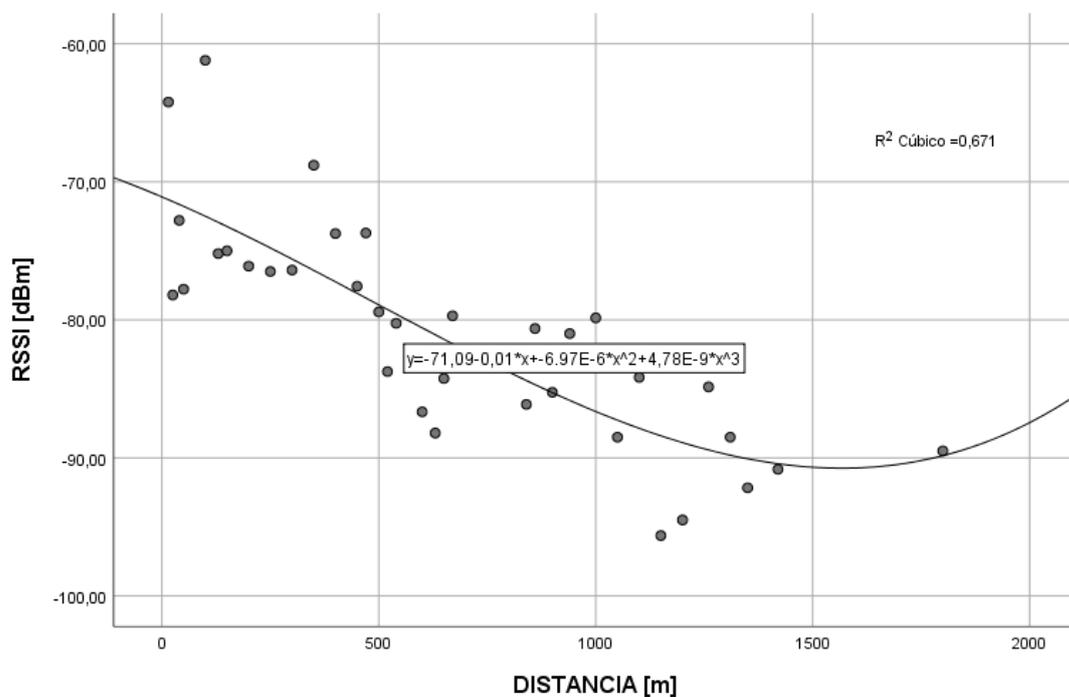


Figura 40 Estimación de modelo.

Como se observa en la figura 40 la distribución de los datos sigue un modelo polinomial de grado 3, esto implica que los datos exhiben una relación no lineal que puede ser descrita por una función polinomial de tercer grado.

En esto observamos que, el coeficiente de determinación R^2 es igual a 0.67, en un modelo polinomial de grado 3, significa que aproximadamente el 67% de la variabilidad en la variable dependiente puede ser explicada por el modelo polinomial de tercer grado.

De tal forma que el coeficiente de determinación R^2 proporciona una medida de la bondad de ajuste del modelo a los datos. Cuanto más cercano sea R^2 a 1, mejor se ajusta el modelo a los datos, lo que indica que una mayor proporción de la variabilidad en la variable dependiente es explicada por el modelo. En este caso, un valor de R^2 de 0.67 sugiere que el

modelo polinomial de grado 3 explica una proporción sustancial, pero no la totalidad, de la variabilidad en los datos.

4.9.3 Prueba de normalidad

En el marco de su proyecto de investigación, se llevó a cabo una prueba de normalidad como parte del análisis de datos. Esta prueba se realizó con el objetivo de evaluar si la distribución de los datos seguía una distribución normal, lo cual es fundamental para aplicar ciertos métodos estadísticos y garantizar la validez de los resultados obtenidos.

La realización de la prueba de normalidad permite verificar si los datos recopilados en el estudio siguen este patrón de distribución. Si los datos se distribuyen normalmente, se pueden aplicar métodos estadísticos paramétricos, como el análisis de varianza (ANOVA), con mayor confianza en la interpretación de los resultados. Por otro lado, si los datos no se distribuyen normalmente, puede ser necesario recurrir a métodos estadísticos no paramétricos o considerar transformaciones de los datos para cumplir con los supuestos de normalidad.

- **Planteamiento de hipótesis:**

H_o : Los datos siguen una distribución normal.

H_a : Los datos no siguen una distribución normal.

Estadístico de prueba:

Shapiro – Wilk si $n \leq 50$
Kolmogorov – Smirnova si $n > 50$

Zona de rechazo:

Si p – valor o "Sig" < 0.05 , se rechaza H_o
Si p – valo o "Sig" ≥ 0.05 , se acepta H_o

Para el análisis correspondiente utilizamos el software estadístico SPSS que brinda las herramientas necesarias para el proceso de análisis de los datos y por ende aplicar una prueba de normalidad. No obstante, es importante mencionar que haremos uso del método shapiro-Wilks ya que el tamaño de muestra es menor a 50.

Tabla 13 Prueba de normalidad.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
DISTANCIA [m]	,081	36	,200*	,958	36	,192
RSSI [dBm]	,072	36	,200*	,981	36	,776

Los resultados de la tabla 13 muestran un estadístico de prueba (W) de 0,958 y un valor p de 0,192 lo que indica que no hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis

de que los datos provienen de una distribución normal. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, ya que no se observa una diferencia sustancial con respecto a una distribución normal.

4.9.4 Análisis de regresión

Tras confirmar la normalidad de los datos mediante una prueba paramétrica, se procedió a llevar a cabo un análisis de regresión para explorar la relación entre la variable dependiente y variables independientes. El análisis de regresión es una técnica estadística que permite examinar cómo una o más variables independientes influyen en la variable dependiente. En este contexto, la normalidad de los datos es un requisito importante para garantizar la validez de los resultados del análisis de regresión, ya que este método asume que las relaciones entre las variables siguen una distribución normal.

Tabla 14 Resumen del modelo del análisis de regresión.

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
,819	,671	,641	4,695

La tabla 14 indica el resultado del análisis, en donde R cuadrado es una medida de cuánta variabilidad en la variable dependiente es explicada por el modelo de regresión. Un valor de R cuadrado más cercano a 1 indica que el modelo explica una mayor proporción de la variabilidad en la variable dependiente. Por lo tanto, R cuadrado = 0,67 indica que aproximadamente el 67% de la variabilidad en la variable dependiente puede ser explicada por las variables independientes incluidas en el modelo de regresión.

En cuanto al error de estimación indica cuánto varían los valores reales de la variable dependiente alrededor de la línea de regresión. Cuanto menor sea este valor, mejor ajustado estará el modelo.

4.9.5 Análisis de varianza (ANOVA)

Tabla 15 Análisis de varianza (ANOVA)

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	1441,052	3	480,351	21,789	,000
Residuo	705,473	32	22,046		
Total	2146,525	35			

Mientras que en un análisis de varianza (ANOVA), la tabla 15 muestra un valor de $F=21,789$ y un valor p-valor o "Sig" = 0, lo que indica que existe al menos una diferencia significativa entre los grupos comparados en relación con la variable de interés. Este hallazgo sugiere que al menos una de las variables independientes incluidas en el análisis está teniendo un efecto estadísticamente significativo en la variable dependiente. Por lo

tanto, se concluye que hay una asociación significativa entre las variables examinadas y que estas diferencias observadas entre los grupos no son atribuibles al azar.

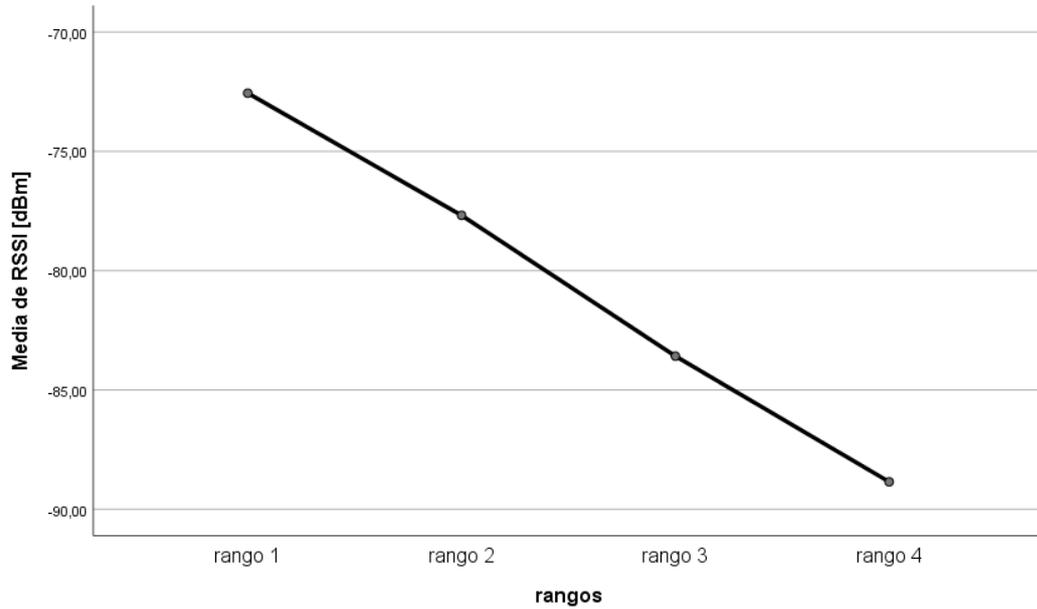


Figura 41 Gráfico de medias de la calidad de la señal con respecto a la distancia.

El gráfico de medias de RSSI con respecto a la distancia (rangos) en la figura 41 proporciona una representación visual de cómo varía la intensidad promedio de la señal recibida a medida que aumenta la distancia entre el transmisor y el receptor. Observando el gráfico, se puede apreciar una tendencia descendente en el RSSI a medida que la distancia aumenta, lo que sugiere una atenuación gradual de la señal a través del espacio libre. Esta disminución en la intensidad de la señal a distancias mayores puede tener implicaciones importantes para la cobertura y la confiabilidad de la comunicación inalámbrica en el entorno de estudio.

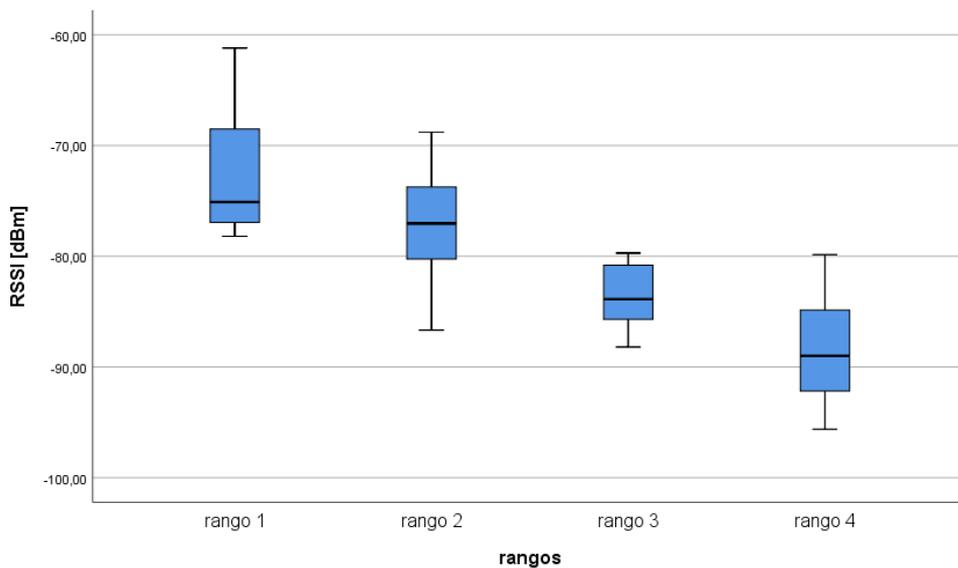


Figura 42 Diagrama de cajas de RSSI con respecto a la distancia (rangos).

Observando el diagrama de la figura 42, podemos identificar patrones en la distribución del RSSI y su relación con la distancia entre el transmisor y el receptor. Este análisis visual nos ayuda a comprender la estabilidad y consistencia de la señal inalámbrica en función de la distancia, lo que puede ser fundamental para optimizar la comunicación en nuestra investigación.

El diagrama de cajas que se muestra en la figura 43 del porcentaje de paquetes exitosos con respecto a la distancia ofrece una representación visual de cómo varía la tasa de éxito de la transmisión de datos a diferentes distancias entre el emisor y el receptor. Observando el diagrama, podemos identificar tendencias en la distribución de la tasa de éxito y su relación con la distancia. Por ejemplo, podemos observar si hay una disminución gradual o abrupta en el porcentaje de paquetes exitosos a medida que aumenta la distancia. Además, el diagrama nos permite identificar posibles valores atípicos que podrían indicar condiciones inusuales en el entorno de transmisión, como interferencias o bloqueos.

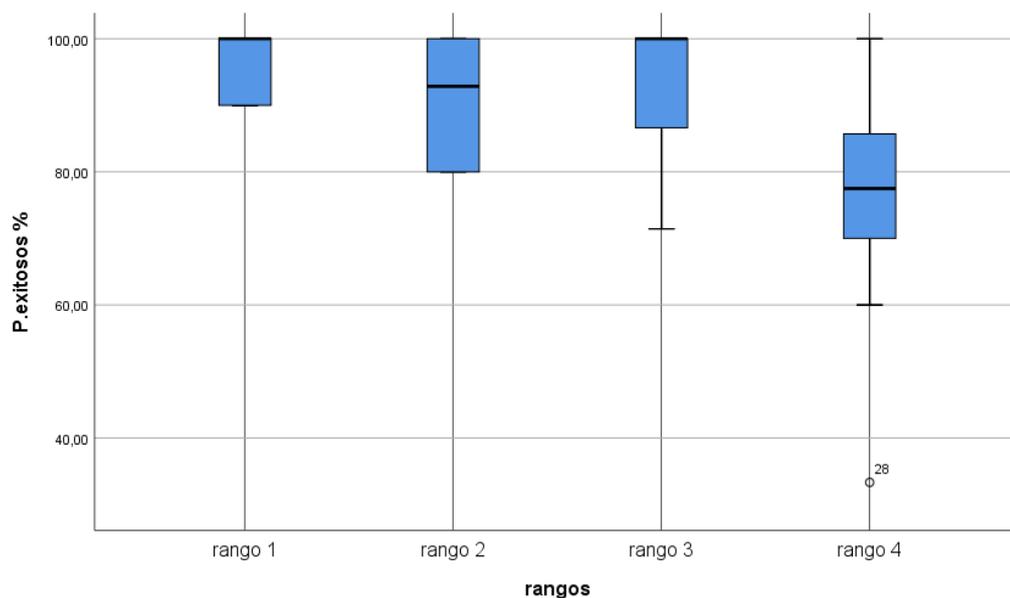


Figura 43 Porcentaje de paquetes exitosos con respecto a la distancia

Desde este análisis, podemos inferir que la distancia entre el transmisor y el receptor puede tener un impacto en la transmisión de paquetes. Sin embargo, es importante reconocer que existen otros factores que podrían estar involucrados en esta dinámica. En el contexto de la comunicación inalámbrica, la calidad de la transmisión puede verse afectada por obstáculos físicos, interferencias electromagnéticas u otras condiciones ambientales. Por lo tanto, aunque la distancia puede ser un factor importante, no es el único que determina la fiabilidad de la comunicación inalámbrica.

En este sentido podemos evidenciar en las figuras 44 y 45, que en la toma de datos existe un decline de paquetes perdidos y exitosos mismo que pueden ser explicados con los criterios ya mencionados.

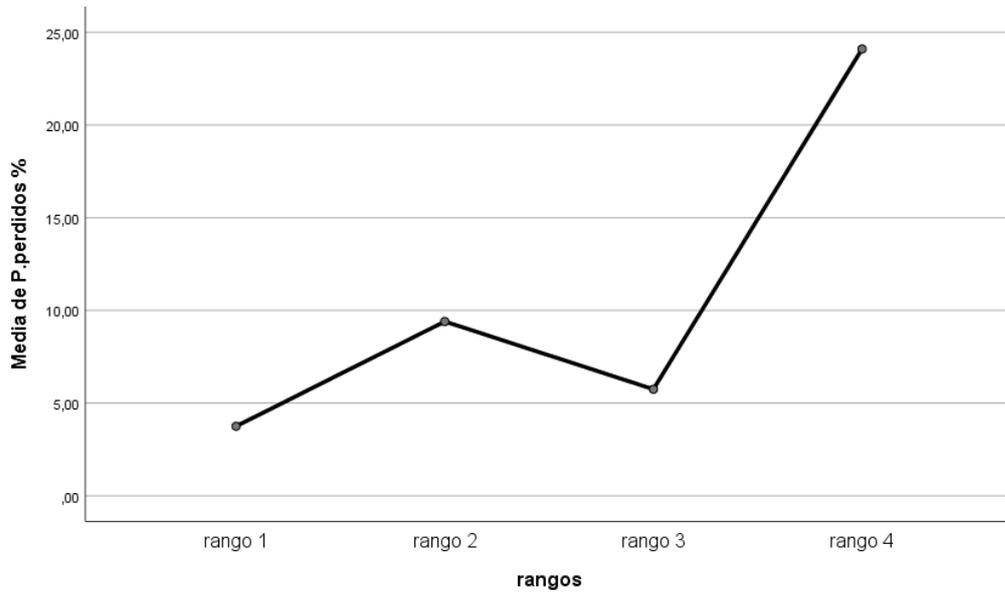


Figura 44 Media de probabilidad de perdida de paquetes.

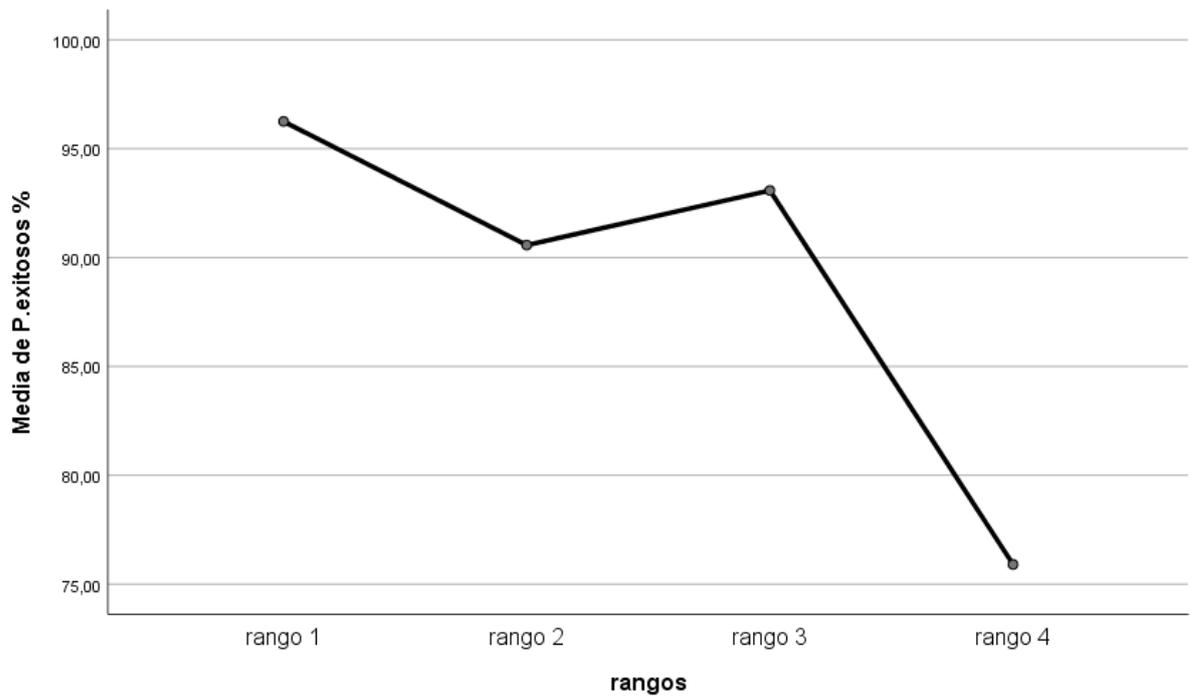


Figura 45 Media de probabilidad de entrega de paquetes exitosos.

4.9.6 Análisis de correlación

La tabla 16 muestra un coeficiente de correlación de -0.802 en una correlación de Pearson entre la distancia (variable independiente) y el RSSI (variable dependiente) indica una correlación negativa fuerte entre estas dos variables. Esto significa que a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor LoRa aumenta, el valor del RSSI tiende a disminuir de manera significativa.

En este contexto, el valor negativo del coeficiente de correlación indica que hay una relación inversa entre la distancia y el RSSI: a medida que la distancia aumenta, el RSSI tiende a disminuir. Este tipo de correlación es común en situaciones donde la señal se atenúa a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta, lo que es esperable en sistemas de comunicación inalámbrica como el LoRa.

Tabla 16 Correlación entre variable distancia y RSSI.

		DISTANCIA [m]	RSSI [dBm]
DISTANCIA [m]	Correlación de Pearson	1	-,802**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	36	36
RSSI [dBm]	Correlación de Pearson	-,802**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	36	36

4.9.7 Discusión

El análisis estadístico detallado revela una degradación significativa en la señal RSSI a medida que varía la distancia entre el transmisor y el receptor LoRa. Esta degradación resulta en una moderada afectación en el envío de paquetes, evidenciando una disminución en la calidad de la transmisión. A pesar de esta correlación entre la distancia y la degradación de la señal, el impacto general se considera manejable, con el sistema aun siendo capaz de operar dentro de parámetros aceptables.

En general, aunque existe una relación directa entre la variación de distancia y la degradación de la señal, el desempeño del sistema se mantiene en un nivel satisfactorio. Esto sugiere que, si bien es importante monitorear y ajustar la distancia entre el transmisor y el receptor para mantener la calidad de la señal, el sistema aún puede funcionar de manera efectiva en diversas condiciones operativas.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Tras un análisis exhaustivo de las diferentes tecnologías LPWAN, incluyendo LoRa, Sigfox y NB-IoT, se ha seleccionado LoRa como la opción preferida. Esta elección se justifica por su accesibilidad, costo y facilidad de implementación para proporcionar una cobertura extendida con una infraestructura rentable. En este sentido, el análisis comparativo de cada tecnología ha llevado a la conclusión de que LoRa ofrece el equilibrio óptimo de características para satisfacer los requisitos específicos del proyecto de investigación.
- La prueba de calidad de la señal reveló que la tecnología LPWAN presenta limitaciones significativas en cuanto a la distancia de transmisión efectiva. Se observó una degradación de la señal desde los 1000 metros hasta los 1800 metros. Estos hallazgos sugieren que, para implementaciones a larga distancia, se deben considerar alternativas como el uso de dos o más gateways en la red, dado que cada módulo LoRa actúa como transceptor lo que posibilita este escalamiento de la red.
- La implementación exitosa de una red LPWAN para el monitoreo del consumo eléctrico requiere una cuidadosa selección de la ubicación de los dispositivos de comunicación y sensores. Esta selección debe considerar no solo la distancia entre los dispositivos, sino también el entorno físico, con el fin de garantizar una comunicación y operación de sensores y actuadores confiable y estable.
- La implementación de una red de monitoreo de consumo eléctrico emerge como un recurso crucial para agilizar los procesos de lectura de consumo, más aún en zonas alejadas de la ciudad. Esta tecnología no solo automatiza la recolección de datos, reduciendo la carga de trabajo y los costos asociados a la lectura manual, sino que también mejora la precisión y confiabilidad de las mediciones al eliminar errores de lectura. En última instancia, la implementación de esta red no solo impulsa la modernización de infraestructuras eléctricas, sino que también contribuye al desarrollo sostenible y al bienestar de la población garantizando una gestión más eficiente de la energía.

5.2 Recomendaciones

- Seleccionar nodos finales y gateways con la tecnología LPWAN adecuada que se ajusten a las necesidades específicas del sistema. Es crucial priorizar dispositivos con un alcance adecuado, especialmente en entornos urbanos donde la conectividad puede ser desafiante.
- Optimizar el despliegue de la red LoRa, lo que implica realizar un análisis detallado del entorno para identificar posibles obstáculos e interferencias que puedan afectar la conectividad. Estratégicamente, la ubicación de los nodos y gateways debe maximizar la cobertura y minimizar los puntos ciegos en el monitoreo.
- Implementar medidas de seguridad robustas, incluida la encriptación de datos, para proteger la integridad y la confidencialidad de la información transmitida a través de la red LoRa. En este sentido, garantizar que solo las personas autorizadas puedan acceder a la información recolectada.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Martins, C. Patrão, P. Moura y A. Almeida, "A Review of Energy Modeling Tools for Energy Efficiency in Smart Cities," *Smart Cities*, vol. 4, n° 4, pp. 1420-1436, 2021.
- [2] M. Schadhauer, J. Robert, A. Heuberger y B. Edler, "Spectrum Segmentation Techniques for Edge-RAN Decoding in Telemetry-Based IoT Networks," *IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, pp. 1-8, 2021.
- [3] F. Capraro, S. Tosetti, V. Mut, P. Campillo, A. Olgún y D. Pacheco, "Implementación del sistema "Telemetría Agrícola" para el manejo y análisis de estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de tomate.," *XI Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIHO 48 (Salta, 2019)*, pp. 1-12, 2019.
- [4] B. Chaudhari, M. Zennaro y S. Borkar, "LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations," *Future Internet*, vol. 12, n° 3, p. 46, 2020.
- [5] F. Villacres y E. Inga, "Planning and Sizing of Electrical Networks of Underground Distribution by Metaheuristic Method," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 15, n° 30, pp. 141-166, 2019.
- [6] A. Arciniegas, D. Imbajoa y J. Revelo, "Design and implementation of a Smart Measurement System for AMI in the microgrid of the University of Nariño," *Enfoque UTE*, vol. 8, n° 1, pp. 300 - 314, 2017.
- [7] A. G. Andrade Guerrero y L. P. Lozada Torres, "Diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente de energía eléctrica para consumos residenciales," *Bachelor's thesis, Ecuador: La Mana: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)*, 2022.
- [8] S. Giest, " Making energy personal: Policy coordination challenges in UK smart meter implementation," *Journal of Public Policy*, vol. 40, n° 4, pp. 553-572, 2020.
- [9] M. Kočański, K. Korczak y T. Skoczkowski, "Technology Innovation System Analysis of Electricity Smart Metering in the European Union," *Energies*, vol. 13, n° 4, p. 916, 2020.
- [10] C. González, F. Arévalo y J. Hernández, "Análisis de seguridad en redes LPWAN para dispositivos IoT," *Revista vínculos*, vol. 16, n° 2, pp. 252-261, 2019.
- [11] P. Malhotra, Y. Singh, P. Anand, K. D. Bangotra, P. Singh y W.-C. Hong, "Internet of Things: Evolution, Concerns and Security Challenges," *Sensors*, vol. 21, n° 5, p. 1809, 2021.
- [12] P. Brous, M. Janssen y P. Herder, "The dual effects of the Internet of Things (IoT): A systematic review of the benefits and risks of IoT adoption by organizations," *International Journal of Information Management*, vol. 51, p. 101952, 2020.

- [13] D. Avancini, J. Rodrigues, S. Martins, R. Rabêlo, J. Al-Muhtadi y P. Solic, "Energy meters evolution in smart grids: A review," *Journal of cleaner production*, vol. 217, pp. 702-715, 2019.
- [14] S. Chakraborty, S. Das, T. Sidhu y A. Siva, "Smart meters for enhancing protection and monitoring functions in emerging distribution systems.," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 127, p. 106626, 2021.
- [15] A. Marahatta, Y. Rajbhandari, A. Shreshta, A. Singh, A. Thapa y S. Shin, "LoRa Mesh Network for Smart Metering in Rural Electrification," *En The 9th International Conference on Smart Media and Applications*, pp. 319-324, 2020.
- [16] M. FERNÁNDEZ y J. UQUILLAS, "Análisis de Desempeño del Estándar LORAWAN para Soluciones de Smart Campus, Implementando un Sistema de Monitoreo IoT en la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE," *UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS.*, p. 227, 2020.
- [17] C. A. Mallorquí, "Trustworthiness Mechanisms for Long-Distance Networks in Internet of Things," *Universitat Ramon Llull. Departament d'Empresa i Tecnologia*, p. 234, 2023.
- [18] A. Barragan y A. Llanes, "THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT IN ECUADOR FROM THE USE OF RENEWABLE ENERGY," *Universidad Ciencia y Tecnología*, vol. 24, n° 104, pp. 36-46, 2020.
- [19] A. E. Pilicita-Garrido y D. C. Cevallos-Duque, "Innovación tecnológica de un sistema integral para monitorear el consumo eléctrico," *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, n° 22, pp. 9-16, 2019.
- [20] R. K. Singh, P. P. Puluckul y e. al, "Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application," *Sensors*, vol. 20, n° 17, p. 4794, 2020.
- [21] M. Iqbal, A. Y. M. Abdullah y F. Shabnam, "An application based comparative study of LPWAN technologies for IoT environment," *In 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, pp. 1857-1860, 2020.
- [22] J. Rubio-Aparicio y e. al, "Design and implementation of a mixed IoT LPWAN network architecture.," *Sensors*, vol. 19, n° 3, p. 675, 2019.
- [23] M. Cava, "Sistema de monitorización para elementos móviles IoT mediante redes LPWAN," *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA*, 2020.
- [24] E. Tolocka, "ProfeTolocka," 16 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.profetolocka.com.ar/>. [Último acceso: 6 Junio 2023].
- [25] InBels, "InBels Creative Minds," [En línea]. Available: <https://inbels.com/key-services/lpwan-integrated-iot-devices/>. [Último acceso: 29 Marzo 2024].
- [26] J. Gomez, "Impact of SCHC Compression and Fragmentation in LPWAN: A Case Study with LoRaWAN," *Sensors*, vol. 20, n° 1, p. 280, 2020.
- [27] J. Cecílio, P. Ferreira y A. Casimiro, "Evaluation of LoRa technology in flooding prevention scenarios.," *Sensors*, vol. 20, n° 14, p. 4034, 2020.

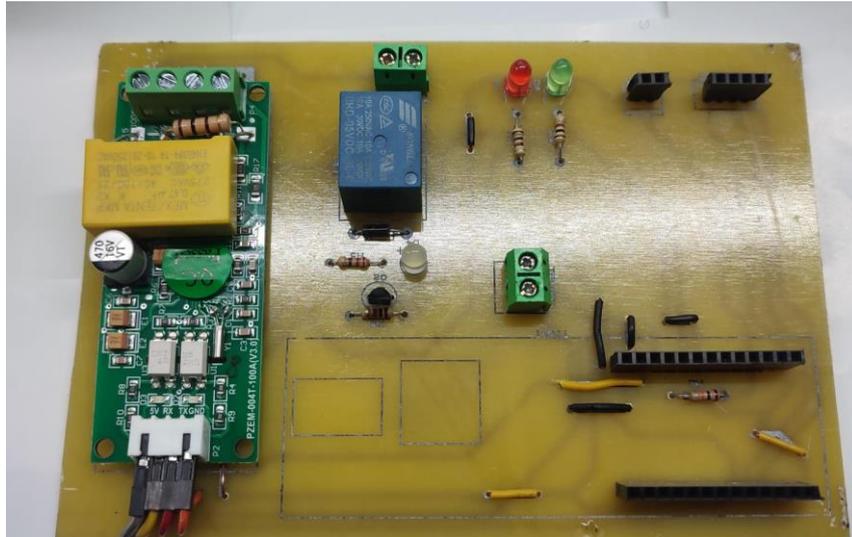
- [28] R. Andrade y S. Yoo, "A Comprehensive Study of the Use of LoRa in the Development of Smart Cities," *Applied Sciences*, vol. 9, n° 22, p. 4753, 2019.
- [29] B. Miles, E.-B. Bourennane, S. Boucherkha y S. Chikhi, "A study of LoRaWAN protocol performance for IoT applications in smart agriculture.," *Computer Communications*, vol. 164, pp. 148-157, 2020.
- [30] M. Ertürk, M. Aydın, M. Büyükakkaşlar y H. Evirgen, "A survey on LoRaWAN architecture, protocol and technologies.," *Future Internet*, vol. 11, n° 10, p. 216, 2019.
- [31] Venco Electronica, "Qué es LoRa, cómo funciona y características principales," 25 Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.vencoel.com/>. [Último acceso: 6 Junio 10].
- [32] M. A. Hemjal, "Sigfox Based Internet of Things: Technology, Measurements and Development," *MS thesis*, 2019.
- [33] Sigfox Technical Overview, "Sigfox," 2018. [En línea]. Available: www.sigfox.com. [Último acceso: 12 Junio 2023].
- [34] H. Alqurashi, F. Bouabdallah y E. Khairullah, "SCAP SigFox: A Scalable Communication Protocol for Low-Power Wide-Area IoT Networks," *Sensors*, vol. 23, n° 7, p. 3732, 2023.
- [35] E. Vizcaino y C. Acosta, "Implementación de un sistema para evaluar la cobertura de la red sigfox en el interior de edificaciones," *Enfoque UTE*, vol. 14, n° 1, pp. 33-45, 2023.
- [36] C. B. Mwakwata y et al, "Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives," *Sensors*, vol. 19, n° 11, p. 2613, 2019.
- [37] M. Chen y et all, "Narrow Band Internet of Things," *IEEE access*, vol. 5, pp. 20557-20577, 2017.
- [38] M. Dangana y et al, "Suitability of NB-IoT for Indoor Industrial Environment: A Survey and Insights," *Sensors*, vol. 21, n° 16, p. 5284, 2021.
- [39] elvaco, "Acerca de nocotros: Elvaco," [En línea]. Available: <https://www.elvaco.com/en/content/nb-iot>. [Último acceso: 29 Marzo 2024].
- [40] G. Valdeón, "Análisis de modelos acerca de electricidad y conductividad eléctrica en estructuras cristalinas," *Tesis de Maestría. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.*, p. 81, 2022.
- [41] M. Ibrahim, W. Dong y Q. Yang, "Machine learning driven smart electric power systems: Current trends and new perspectives," *Energía aplicada*, vol. 272, p. 115237, 2020.
- [42] B. Tillaguango y V. Loaiza, "Efecto causal de la energía sustentable y no sustentable en el crecimiento económico: nueva evidencia empírica global por grupos de países.," *ReVista Económica*, vol. 6, n° 1, pp. 37-48, 2019.
- [43] repositorio.tec.mx, "Smart grid: las redes eléctricas del futuro," [En línea]. Available: <https://repositorio.tec.mx>. [Último acceso: 31 Mayo 2023].

- [44] W. Guastay, "El uso de la energía hidráulica para la generación de energía eléctrica como estrategia para el desarrollo industrial en el Ecuador.," *Universidad Internacional SEK*, 2020.
- [45] A. Guardiola-Víllora y L. Basset-Salom, "TORRES TRANSFORMADORAS DE ELECTRICIDAD EN LA PROVINCIA DE VALENCIA. UN PATRIMONIO EN EL OLVIDO," *III CONGRESO INTERNACIONAL DE PATRIMONIO INDUSTRIAL Y DE LA OBRA PÚBLICA*, p. 12, 2021.
- [46] G. Alvarez, "Modelado y optimización de sistemas interconectados de generación de energía eléctrica. Programación de la operación y del transporte," 2019.
- [47] N. Obando, "Diseño e implementación de un sistema de medición y monitorización del consumo de energía eléctrica, para su integración en medidores de energía domiciliaria en la ciudad de El Ángel," *Universidad Técnica del Norte*, p. 220, 2022.
- [48] C. EP, "Perspectiva y expansión del sistema eléctrico ecuatoriano," [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/>. [Último acceso: 31 Mayo 2023].
- [49] J. Castro, G. Gómez y O. Núñez, "Índice de estimación de la vida residual en transformadores eléctricos de potencia basado en condición.," *Revista Tecnología en Marcha*, pp. ág. 71-83, 2022.
- [50] Á. Nuñez, "Instalaciones eléctricas seguras y prevención del riesgo eléctrico en base a la normatividad vigente en instalaciones interiores en la provincia de Cusco periodo-2020.," p. 137, 2020.
- [51] J. Morocho, « Diagnóstico del estado de las instalaciones eléctricas del campamento de la Fundación Nueva Vida para la elaboración de una propuesta de modernización y eficiencia energética,» *BS thesis. Quito*, p. 127, 2019.
- [52] B. Sandoya, "Sistema de monitoreo inteligente de consumo de energía eléctrica (Smart Metering) con Tecnología Lora para hogares en la ciudad de Ambato. BS thesis. Universidad Técnica de Ambato," *Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones*, p. 167, 2021.
- [53] K. Hernández Pantoja, " Diagnóstico y evaluación de las instalaciones eléctricas en la empresa de servicios en tecnología y telecomunicaciones WODEN Ecuador SA con criterios de eficiencia energética.," *BS thesis. Quito*, p. 140, 2021.
- [54] I. Kiprijanovska, S. Stankoski, I. Igor, S. Jovanovski, M. Gams y H. Gjoreski, "HousEEC: Day-Ahead Household Electrical Energy Consumption Forecasting Using Deep Learning," *Energies*, vol. 13, n° 10, p. 2672, 2020.
- [55] Trilliant, "Diferencia entre medidores tradicionales e inteligentes," 10 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://primestone.com/>. [Último acceso: 1 Junio 2023].
- [56] R. Mitchell, "wikiHow," [En línea]. Available: <https://es.wikihow.com/leer-un-medidor-de-electricidad>. [Último acceso: 29 Marzo 2024].
- [57] D. Avancini y e. al, " Energy meters evolution in smart grids: A review.," *Journal of cleaner production*, vol. 217, pp. 702-715, 2019.

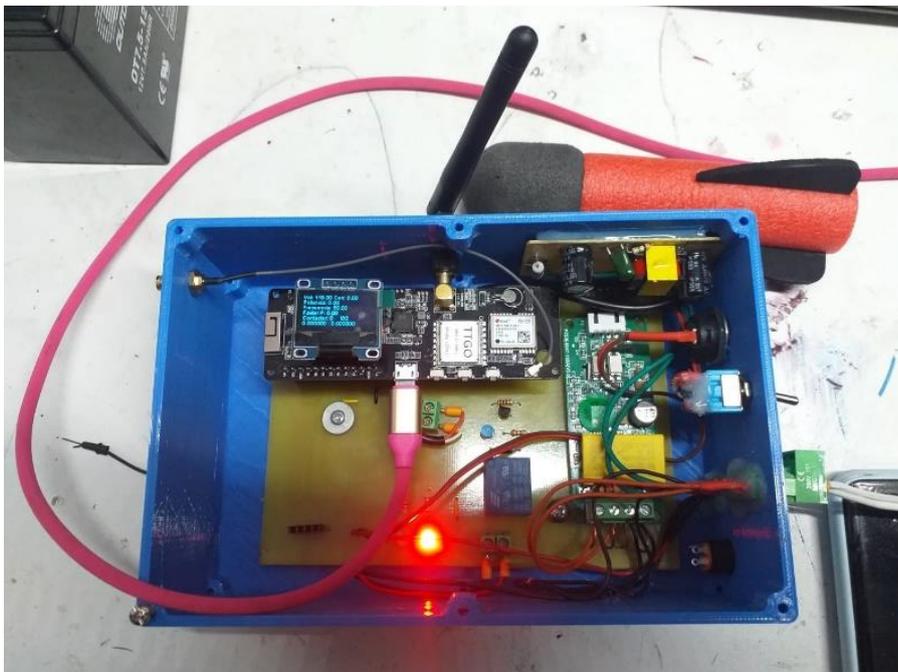
- [58] G. Peter y S. B. Iderus, "Design of enhanced energy meter using GSM prepaid system and protective relays.," *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, pp. 582-589, 2021.
- [59] O. Butt, M. Zulqarnain y T. Butt, "Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, n° 1, pp. 687-695, 2021.
- [60] M. Elsisy, K. Mahmoud y e. al, "Reliable Industry 4.0 Based on Machine Learning and IoT for Analyzing, Monitoring, and Securing Smart Meters," *Sensors*, vol. 21, n° 2, p. 487, 2021.
- [61] J. F. Martins y e. al, "Smart meters and advanced metering infrastructure.," *Pathways to a smarter power system. Academic Press*, pp. 89-114, 2019.
- [62] L. E. e. Pereira, *Metodología de la investigación*, Klik, 2022.
- [63] G. Guevara, A. Verdesoto y N. Castro, "Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción)," *Recimundo*, vol. 4, n° 3, pp. 163-173, 2020.
- [64] J. Sanchez-Gomez, D. García Carrillo, R. Sanchez-Iborra y al et, "Integrating LPWAN Technologies in the 5G Ecosystem: A Survey on Security Challenges and Solutions," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 216437-216460, 2020.
- [65] M. Iqbal, A. Yousha Md Abdullah y F. Shabnam, "An application based comparative study of LPWAN technologies for IoT environment.," *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, pp. 1857-1860, 2020.
- [66] LILYGO®, "LILYGO®," [En línea]. Available: <https://www.lilygo.cc/pages/about-us>. [Último acceso: 13 03 2024].
- [67] Z. Yi, Z. Chen, K. Yin, L. Wang y K. Wang, "Sensing as the key to the safety and sustainability of new energy storage devices," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 8, n° 2, pp. 1-22, 2023.
- [68] P. Rodríguez, "Electricidad básica," [En línea]. Available: <https://electricidad-basica.com/dispositivos-electricos/contactador/>. [Último acceso: 24 Marzo 2024].
- [69] C. Ricardo, "Geekering," 26 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.geekering.com/>. [Último acceso: 31 Marzo 2024].
- [70] C. Siregar, D. Mulyadi y e. all, "Automation and control system on water level of reservoir based on microcontroller and blynk.," *2020 14th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA. IEEE)*, pp. 1-4, 2020.
- [71] J. Wang, M. Lim, C. Wang y M. Tseng, "The evolution of the Internet of Things (IoT) over the past 20 years," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 155, p. 107174, 2021.
- [72] Y. Polak, "The bicentennial history of the electromagnetic telegraph (from Ørsted's experiments to social networks)," *In 2020 International Conference Engineering Technologies and Computer Science (EnT). IEEE*, pp. 99-103, 2020.

- [73] E. ., Lopesino, "Whirlwind I: arquitecturas de la computación como campos de pruebas para los espacios de la modernidad= Whirlwind I: computer architectures as testing grounds for the spaces of modernity.," *Cuadernos de Proyectos Arquitectónicos*, nº 10, pp. 38-51, 2020.
- [74] V. Rajaraman, "A Concise History of the Internet—I," *Resonance*, vol. 27, nº 11, pp. 1841-1856, 2022.
- [75] M. Smith, "The History of Web Archiving and the Evolution of Archive-It's Brozzler," 2019.
- [76] S. Garcia y L. Canchica, "Iot para la calidad de vida de las personas," 2022.
- [77] N. Taucare y E. Collado, "Desarrollo e implementación de un sistema inteligente de administración del consumo eléctrico domiciliario," 2019.
- [78] P. Guevara y A. Valle, "Diseño e implementación de un sistema de medición de consumo y generación de energía eléctrica residencial y desarrollo de una aplicación en android para monitoreo y recepción de alertas," *BS thesis. Quito*, p. 159, 2021.

7. ANEXOS



Anexo 1 placa PCB para transmisores



Anexo 2 Ensamble de placa para transmisores



Anexo 3 Area de cobertura para toma de pruebas



Anexo 4 Transmisiones de prueba a 1800 metros

```
Emisorpulsat
205 // Serial.print("Custom Address:");
206 // Serial.println(pzem.readAddress(), HEX);
207 // Read the data from the sensor
208 float voltage = pzem.voltage();
209 float current = pzem.current();
210 float power = pzem.power();
211 float energy = pzem.energy();
212 float frequency = pzem.frequency();
213 float pf = pzem.pf();
214 // Check if the data is valid
215 if(isnan(voltage))
216 {
217     Serial.println("Error reading voltage");
218 modo=1;
219
220 } else if (isnan(current)) {
221     Serial.println("Error reading current");
222 } else if (isnan(power)) {
223     Serial.println("Error reading power");
224 }

Receptorpulsa
307
308 int packetSize = LoRa.parsePacket();
309 if (packetSize) {
310     String packet = "";
311     while (LoRa.available()) {
312         packet += (char)LoRa.read();
313     }
314
315     Serial.println("Paquete recibido:");
316     Serial.println(packet);
317     Serial.print("RSSI: ");
318     Serial.println(LoRa.packetRssi());
319     procesarPaquete(packet, toggle);
320 }
321
322 enviargps1();
323 enviargps2();
324 }
325
TTGO LoRa32-OLED, TTGO LoRa32 V1 (No TFCard), 80MHz, 115200, None, Disabled en COM5
```

Anexo 5 Códigos fuente TX - RX