

IMPLEMENTACIÓN RED LPWA

1

Planificación De La Implementación De Una Red Inalámbrica Lpwa Tipo Lora En El Campus
Central De La Universidad Industrial De Santander.

Sergio Mauricio Jaraba Martínez

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Director

Efrén Darío Acevedo Cárdenas

MIE. Ingeniería electrónica

Co-Director

Homero Ortega Boada

PhD. Ingeniería electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2025

Dedicatoria.

Dedico este trabajo de grado a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Toda la honra y la gloria son para Él, por llenar mi vida de propósito y claridad incluso en los momentos más difíciles.

A mi amada familia, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida. A mi madre y a mi padre, cuya dedicación, sacrificio y amor incondicional me han motivado a superar cada obstáculo. Sus palabras de aliento, sus enseñanzas y su constante apoyo me han impulsado a llegar hasta aquí.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, por brindarme una educación de calidad, un entorno enriquecedor y las herramientas necesarias para alcanzar este logro. A mis profesores, quienes con su paciencia y conocimientos dejaron huella en mi formación, y a mis compañeros, con quienes compartí aprendizajes, desafíos y momentos inolvidables.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a cada una de las personas que, de una u otra manera, han sido parte de este proceso. Cada gesto de apoyo, consejo, palabra de ánimo o aporte, por pequeño que parezca, ha sido un grano de arena que sumó para alcanzar este sueño. Este logro no ha sido fácil, pero gracias a todos ustedes, se ha hecho realidad.

Sergio Mauricio Jaraba Martínez.

Agradecimientos.

A todos los profesores de la Universidad Industrial de Santander, quienes a lo largo de nuestra formación profesional desempeñaron un papel fundamental, no solo transmitiendo conocimientos, sino también inculcando valores y pasión por el aprendizaje.

Un agradecimiento especial al profesor Efrén Darío Acevedo Cárdenas, por su paciencia, dedicación y valioso asesoramiento. Su experiencia y profundo conocimiento fueron una guía esencial para la orientación y desarrollo de este proyecto de investigación.

Sergio Mauricio Jaraba Martínez.

Contenido

Introducción.	1
1. Objetivos.	3
1.1 Objetivo general.	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
2. Marco teórico.	4
2.1 Antecedentes.	4
3. Marco conceptual	7
3.1 IoT (Internet of Things).....	7
3.2 Sensores IoT.....	7
3.3 Topología de Red.	8
3.4 LPWAN (Low Power Wide Area Network).	8
3.5 LoRa.	9
3.6 LoRaWAN.	10
3.7 Gateway LoRaWAN.	12
3.8 Protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).....	12
3.9 Seguridad de la Red.....	12
3.10 Dashboard.....	13
3.11 Plan de canales LoRaWAN a nivel mundial.	13
<i>Plan AU915-928 MHz</i>	14
3.12 Dispositivos y hardware utilizados.	17
3.12.1 <i>Dragino LG02.</i>	17
3.12.2 <i>TTGO T-Beam.</i>	18
3.12.3 <i>Análisis de documentación y selección de componentes.</i>	19

IMPLEMENTACIÓN RED LPWA

5

4. Metodología.....	22
5. Desarrollo de la metodología.....	25
Fase 1: Análisis de Requerimientos y Cobertura del Campus.....	25
Fase 2: Diseño de la Arquitectura de la Red LoRa.....	26
Fase 3: Desarrollo de Protocolos de Integración.....	28
Fase 4: Implementación y Pruebas Iniciales.....	30
Fase 5: Evaluación Continua y Ajustes.....	32
6. Resultados.....	34
6.1 Análisis de Cobertura y Diseño de la Red.....	34
6.3 Pruebas de Conectividad.....	36
6.4 Comparativa de Mediciones.....	36
6.5 Consideraciones Finales.....	37
7. Conclusiones.....	38
8. Recomendaciones.....	40
Referencias bibliográficas.....	41

Lista de tablas.

	Pág.
Tabla 1 Plan de canalización LoRaWAN a nivel mundial definida por la Lora Alliance	20
Tabla 2 Evaluación Comparativa de Sensores y Dispositivos LoRa	27

Lista de ilustraciones.

Figura 1 Red LoRaWAN típica con sus elementos.	11
Figura 2 Canales definidos para el plan de canalización AU915.	15
Figura 3 Dragino LG02	17
Figura 4 TTGO T-Beam	18
Figura 5 Representación gráfica de la metodología planificación y diseño de Infraestructura LoRa.	24
Figura 6 Circuito receptor de datos.	26
Figura 7 Esquema de la topología de la red LoRa en el campus universitario UIS.	27
Figura 8 Diagrama de flujo de los protocolos de integración	28
Figura 9 Código desarrollado para la conexión del TTGO con LoRa.	29
Figura 10 Evidencia del receptor de datos ubicado en la e3t uis.	30
Figura 11 Estación uno ubicada en el edificio de Humanas Uis.	31
Figura 12 Diagrama de barras de Temperatura (°C) y humedad (%) promedio por día.	31
Figura 13 Dashboard de monitoreo del rendimiento la red LoRa.	32
Figura 14 Gráfico de líneas (con dos ejes), de la temperatura y humedad de la ESP32, TTGO T-Beam.	33
Figura 15 Mapa topográfico con la ubicación óptima de los gateways y nodos LoRa.	34
Figura 16 Gráfico de torta de coberturas y zonas de sombra.	35
Figura 17 Gráfica de comparación de temperatura y humedad en pruebas con la TTGO T-Beam, por 10 días.	36

Lista de apéndices.

(Los apéndices pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Tabla de comparación de componentes.

Apéndice B. Código del Sistema de Transmisión de Datos mediante LoRa.

Apéndice C. Pruebas Diarias de los Dispositivos ESP32 y TTGO T-Beam.

Apéndice D. Documentación del Dashboard de Monitoreo de Temperatura y Humedad.

Resumen.

Título: PLANIFICACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA LPWA TIPO LoRa EN EL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Autor: Sergio Mauricio Jaraba Martínez

Palabras clave: Comunicaciones Inalámbricas, Red LoRa, Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Tecnología IoT, Infraestructura de Comunicación, Validación de Tecnologías Investigación y Desarrollo, Conectividad de Largo Alcance.

Descripción: Este proyecto tiene como objetivo planificar e implementar una red inalámbrica de baja potencia y largo alcance (LPWA) basada en tecnología LoRa, diseñada para monitorear variables ambientales como la humedad y la temperatura en el campus central de la Universidad Industrial de Santander. Surge de la necesidad de contar con una infraestructura eficiente que permita la conectividad de largo alcance con bajo consumo energético, contribuyendo a la sostenibilidad y al avance de la investigación académica.

El desarrollo del proyecto abarca desde el análisis de necesidades hasta la validación del sistema, incluyendo la selección y configuración de sensores DHT11, nodos LoRa y el gateway Dragino LG02. Las pruebas iniciales realizadas en entornos controlados y la posterior implementación en áreas específicas del campus permitieron obtener datos en tiempo real, optimizando la gestión ambiental, especialmente en zonas verdes.

Se aplicaron técnicas avanzadas de diseño de redes y herramientas de simulación para asegurar una cobertura eficiente y garantizar la robustez del sistema. La flexibilidad y escalabilidad de la red diseñada la convierten en una solución adaptable a nuevas aplicaciones, siendo un aporte significativo tanto para la gestión ambiental como para el desarrollo de futuros proyectos tecnológicos en el ámbito del IoT y la educación

*** Trabajo de Grado**

**** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Electrónica. Director: M. IE. Efrén Darío Acevedo Cárdenas. Codirector: P. hD. Homero Ortega Boada.**

Abstract.

Title: Planning the Implementation of a LoRa-Type LPWA Wireless Network on the Central Campus of the Industrial University of Santander

Author: Sergio Mauricio Jaraba Martinez

Keywords: Wireless Communications, LoRa Network, Electronics, Industrial University of Santander, IoT Technology, Communication Infrastructure, Technology Validation, Research and Development, Long-Range Connectivity.

Description: This project aims to plan and implement a low-power, long-range wireless network (LPWA) based on LoRa technology, designed to monitor environmental variables such as humidity and temperature on the central campus of the Universidad Industrial de Santander. It addresses the need for an efficient infrastructure capable of providing long-range connectivity with low energy consumption, contributing to sustainability and academic research.

The project covers multiple phases, from analyzing requirements to system validation, including the selection and configuration of DHT11 sensors, LoRa nodes, and the Dragino LG02 gateway. Initial tests conducted in controlled environments and subsequent implementation in specific areas of the campus enabled the collection of real-time data, optimizing environmental management, particularly in green spaces.

Advanced network design techniques and simulation tools were applied to ensure efficient coverage and system reliability. The flexibility and scalability of the designed network make it an adaptable solution for new applications, representing a significant contribution to environmental management and the development of future technological projects in IoT and education.

*** Degree Work**

**** Faculty of Physicmechanics Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electronic Engineering. Director: M. IE. Efrén Darío Acevedo Cárdenas. Codirector: P. hD. Homero Ortega Boada.**

Introducción.

La comunicación inalámbrica se ha convertido hoy en día en una herramienta indispensable para el desarrollo de nuevas tecnologías y la implementación de soluciones IoT (Internet de las cosas) en muchos campos. Una de las tecnologías cada vez más populares es LoRa (largo alcance), que permite transmitir información a largas distancias con un bajo consumo energético; permite el despliegue de redes de comunicación, especialmente para sensores inalámbricos de bajo coste (García A. y López M. (2020) El objetivo principal del proyecto fue desplegar una red LoRa para monitorear la humedad y la temperatura en un área específica del campus de la Universidad Industrial de Santander (UIS), esta iniciativa nació con el fin de demostrar la viabilidad y eficacia de la tecnología LoRa en un contexto académico (Pérez, R. y Martínez, E. 2021), sentando las bases para aplicaciones y proyectos relacionados sobre el futuro de IoT en una organización como el laboratorio de comunicaciones móviles para abrir el campo. La decisión de utilizar monitoreo de humedad y temperatura se tomó debido a la necesidad de recopilar datos en tiempo real sobre las condiciones ambientales en el campus como parte de un proyecto piloto para la red planificada. Estos datos podrán luego utilizarse para la gestión de espacios verdes, siendo el objetivo principal facilitar la investigación científica en diversos campos que requieren esta nueva tecnología. El proyecto se dividió en varias fases, incluida la determinación de la ubicación de la instalación, la selección y compra del equipo necesario, el diseño de la estructura de la red LoRa, la configuración e instalación de los componentes y la realización de pruebas para garantizar que el sistema funcione normalmente. Además, se mantuvo documentación detallada de todas las etapas del proyecto, que sirvió de base al informe final. La implementación de una red LoRa en el campus de la UIS será un paso importante hacia la integración de nuevas tecnologías en la

IMPLEMENTACIÓN RED LPWA

2

infraestructura académica, mejorando las capacidades de innovación de la universidad en el espacio IoT y proporcionando valiosas herramientas de investigación. Este proyecto no sólo tiene el potencial de mejorar la gestión ambiental en el campus, sino que también abre nuevas oportunidades para desarrollar soluciones inteligentes en una variedad de áreas dentro y fuera del campus.

1. Objetivos.

1.1 Objetivo general.

Implementar una red LoRa para el monitoreo de la humedad y temperatura en un área específica del campus de la Universidad Industrial de Santander.

1.2 Objetivos específicos.

- Seleccionar y delimitar bajo simulación un área específica del campus donde se implementará la red LoRa para el monitoreo de la humedad y temperatura.
- Implementar una matriz de evaluación para la selección de sensores, nodos LoRa y gateways adecuados, y adquirir los componentes necesarios para la implementación de la red.
- Implementar la solución planteada en simulación de tal manera que permita evaluar la cobertura de la red y verificar su funcionamiento.
- Desarrollar una plataforma para la visualización de los datos de los sensores en diferentes ubicaciones dentro del área de cobertura.

2. Marco teórico.

En este apartado se exploran los antecedentes de investigación más relevantes y se introducen los conceptos esenciales que sirvieron de base para el desarrollo de este proyecto. Los antecedentes permiten comprender cómo ha evolucionado la tecnología LoRa y sus aplicaciones en entornos académicos, destacando estudios previos sobre redes inalámbricas de largo alcance y bajo consumo energético

Además, se explican conceptos clave como la arquitectura de la red LoRa, los protocolos de comunicación utilizados en redes IoT-LPWA y las herramientas empleadas para diseñar y simular estas redes. Este marco teórico no solo ayuda a contextualizar el proyecto, sino que también facilita la comprensión de las decisiones metodológicas y los resultados obtenidos en la implementación de la infraestructura LoRa dentro del campus universitario.

2.1 Antecedentes.

En el estudio de Cruz Yupanqui (2023), se aborda el reto de la coexistencia de redes inalámbricas dentro de un mismo espectro radioeléctrico, subrayando la importancia de tecnologías como LoRaWAN para reducir interferencias. Se llevaron a cabo pruebas experimentales con nodos TTGO-T BEAM V0.7 y una puerta de enlace Rak7289, evaluando cómo diferentes niveles de interferencia electromagnética afectan los parámetros de transmisión. Los resultados mostraron el impacto de la interferencia en el rendimiento de la red y ofrecieron estrategias para mejorar su resistencia en entornos complicados.

El trabajo de Vallejo Cabezas y Cuesta Cruz (2022) se centra en los efectos del cambio climático en el Parque Nacional Galápagos. Propusieron una red de capa 2 que conecta medidores inteligentes con un centro de datos para monitorear el consumo de energía en tiempo real, promoviendo un uso responsable de la electricidad y la transparencia en la facturación. Esta red tiene como objetivo reducir la dependencia de combustibles fósiles y fomentar prácticas sostenibles para mitigar la contaminación en este ecosistema vulnerable.

En el proyecto de Díaz Piñeiro (2024), se implementó una red LoRa multi-nodo en el Campus de Gijón para la recolección automática de datos IoT, incluyendo parámetros climáticos interiores. La red, monitoreada a través de una plataforma en línea, facilita la gestión de los recursos del campus y fomenta la investigación en tecnologías IoT. Este proyecto establece una base sólida para el desarrollo de futuras soluciones de monitoreo inteligente y refuerza la capacidad de innovación en la Universidad de Oviedo.

El estudio de Pinto Erazo (2020) se enfoca en las redes LPWAN, como LoRa y Sigfox, que se destacan por su eficiencia energética y bajo consumo. Mediante un análisis comparativo, se identificaron aplicaciones en agricultura, industria y telesalud, además de revisar las regulaciones específicas para América Latina. El trabajo también incluyó simulaciones basadas en modelos matemáticos, como el de Okumura-Hata, para predecir la propagación en diferentes escenarios, proporcionando una guía útil para evaluar la viabilidad de estas tecnologías.

Por último, Guevara Zárate (2021) desarrolló una solución IoT utilizando la red LPWAN Sigfox para monitorear en tiempo real la temperatura y ubicación de triciclos que transportan helados. El sistema, que incluye sensores de bajo consumo y un dashboard

IMPLEMENTACIÓN RED LPWA

6

centralizado, optimiza la gestión de flotas y garantiza la calidad del producto. Este enfoque mejora la eficiencia operativa en entornos con acceso limitado a electricidad, destacando el potencial de LPWAN para aplicaciones fuera de instalaciones convencionales.

3. Marco conceptual

En esta sección se explican los supuestos básicos detrás del despliegue de una red de radio de baja potencia (LoRa) en el campus central de la Universidad Industrial de Santander. El marco teórico proporcionó la base conceptual y técnica necesaria para desarrollar una infraestructura de red LoRaWAN diseñada para monitorizar y controlar dispositivos IoT. También se describieron las tecnologías, métodos, supuestos y equipos clave utilizados durante la planificación y la implementación, proporcionando una base sólida para lograr los objetivos y el alcance del proyecto.

3.1 IoT (Internet of Things).

El Internet de las cosas (IoT) es un ecosistema de dispositivos físicos, como sensores y electrodomésticos, conectados a través de redes de comunicaciones. El objetivo fue permitir la recopilación y el intercambio de datos en tiempo real, lo que facilitó la automatización de procesos y la toma de decisiones informada. El Internet de las cosas se utiliza en muchas áreas, entre ellas: en la atención sanitaria, la fabricación y la logística, aumentando la eficiencia y mejorando la comunicación entre dispositivos mediante tecnologías como redes inalámbricas y medios de comunicación. (Vásquez Rodríguez, J. A. 2022)

3.2 Sensores IoT.

Los sensores IoT son dispositivos electrónicos diseñados para recopilar datos del entorno físico utilizando sensores especiales y transmitirlos a través de una red de comunicación para su procesamiento y análisis. Estos sensores pueden medir diversos parámetros como temperatura, humedad, presión, luz, movimiento o sonido y son esenciales para monitorizar y

controlar aplicaciones en entornos IoT. La integración con sistemas de IoT permite la automatización y la toma de decisiones en tiempo real, lo que es fundamental para áreas como la atención médica, la agricultura y la fabricación. (Čolaković & Hadžialić, 2018).

3.3 Topología de Red.

Se refiere a la estructura física o lógica que describe cómo los dispositivos están conectados entre sí en una red de comunicación y cómo se transfieren datos entre ellos. Hay muchos tipos diferentes de topologías de red, como centralizada, en estrella, en malla, en anillo y en árbol, cada una adaptada a necesidades específicas de conectividad y rendimiento. La elección de la arquitectura de red tiene un impacto directo en aspectos como el rendimiento, la escalabilidad y la resiliencia de la red. (Borgia, 2014).

3.4 LPWAN (Low Power Wide Area Network).

Es un tipo de red de área amplia diseñada específicamente para dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) que requieren conectividad de larga distancia con un bajo consumo de energía. Estas redes se caracterizan por ofrecer una gran cobertura, alcanzando distancias de varios kilómetros, dependiendo de si se implementan en áreas urbanas o rurales. (Ismail S., 2019).

Los principales componentes que permiten a las LPWAN lograr comunicaciones de largo alcance entre nodos transmisores y receptores incluyen:

- **Topología de estrella roja:** Simplifica las comunicaciones al conectar directamente los nodos con una estación base central.

- **Técnicas avanzadas de modulación:** Como Chirp Spread Spectrum (CSS) y Ultra Narrow Band (UNB), que optimizan la eficiencia energética y la capacidad de transmisión de datos.

LPWAN puede operar tanto en bandas de frecuencias licenciadas, como las utilizadas por las redes móviles, como en bandas no licenciadas, como el rango de frecuencias ISM (Industrial, Científico y Médico), ampliando su flexibilidad y alcance. Ejemplos destacados de tecnologías LPWAN incluyen: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT.

Esta tecnología es especialmente útil en escenarios donde los dispositivos IoT se ubican en áreas remotas o de difícil acceso, facilitando aplicaciones en agricultura, ciudades inteligentes, monitoreo ambiental, y más.

3.5 LoRa.

Es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para transmitir datos a largas distancias con un consumo energético extremadamente bajo, lo que la convierte en una opción ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Su funcionamiento se basa en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), que permite un equilibrio entre eficiencia energética y alcance, además de ofrecer alta inmunidad al ruido y baja probabilidad de interferencia. (Bertoletti P., 2019).

Esta tecnología opera en la capa física del modelo OSI y permite la comunicación en diversos canales de frecuencia y tasas de datos, que varían entre 300 y 20,000 bits por segundo. Gracias a su elevado presupuesto de enlace, LoRa es capaz de garantizar transmisiones a

grandes distancias incluso en condiciones de ruido o interferencia. Algunas características clave incluyen:

- **Amplia cobertura:** Capacidad para conectar dispositivos ubicados a varios kilómetros de distancia.
- **Eficiencia energética:** Ideal para dispositivos alimentados por baterías de larga duración.
- **Flexibilidad:** Soporta múltiples configuraciones de frecuencia y tasas de datos.
- **Economía:** Compatible con proyectos de bajo presupuesto, lo que la hace accesible para diversas aplicaciones.

3.6 LoRaWAN.

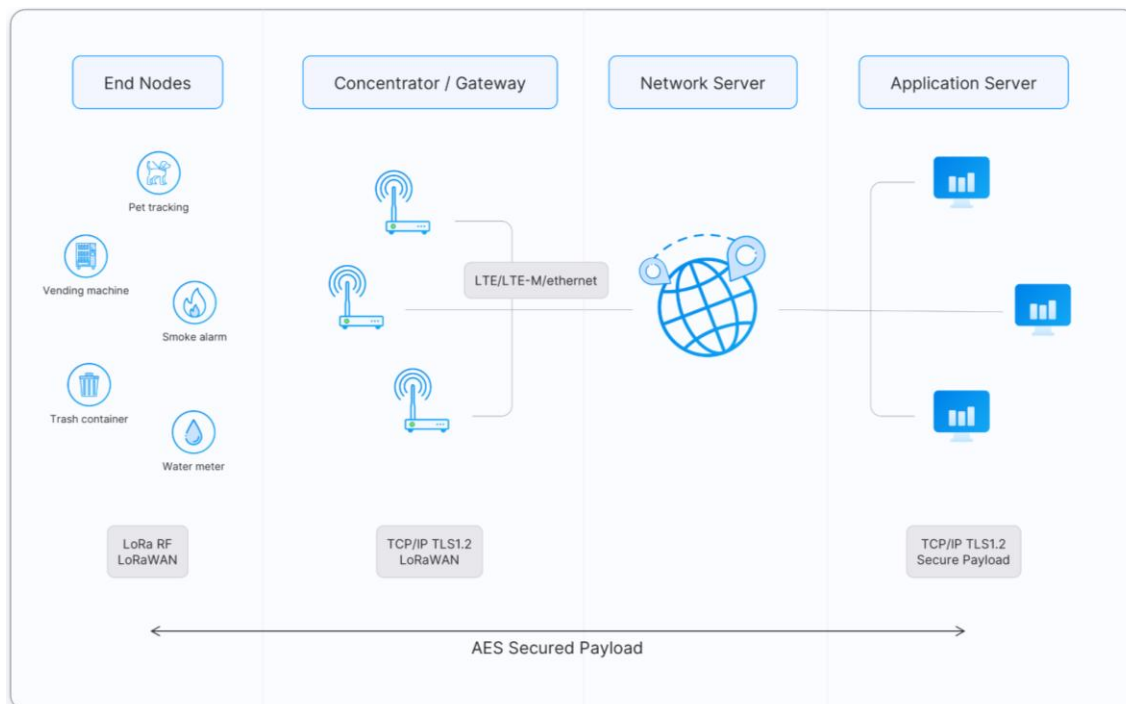
Es una red de área extensa de bajo consumo (LPWAN) que utiliza la capa física LoRa para lograr comunicaciones de larga distancia con bajo consumo energético. Su diseño se centra en administrar aspectos clave como las comunicaciones entre dispositivos, la duración de la batería, la capacidad de la red, la calidad del servicio y la seguridad.

En términos técnicos, LoRaWAN opera tal cual como se observa en la (figura 1). Es decir, en la capa 2 "enlace de datos" del modelo OSI, mientras que LoRa se sitúa en la capa 1 "capa física" del mismo modelo. Esta distinción permite que LoRaWAN sirva como un protocolo de comunicación que estructura la interacción entre dispositivos en una red IoT. Además, LoRaWAN es de código abierto y está auspiciado por la organización Alianza LoRa ("LoRa Alliance"). (Aguilar Zavaleta, S. 2020)

En una red LoRaWAN, los componentes principales incluyen:

- **Dispositivos finales:** Sensores o nodos que recopilan datos ambientales o de otro tipo.
- **Gateways:** Equipos encargados de transmitir los datos desde los dispositivos finales hacia un servidor central.
- **Servidor de red:** Responsable de procesar, gestionar y distribuir la información recopilada por los dispositivos a las aplicaciones correspondientes.

Figura 1 Red LoRaWAN típica con sus elementos.



Fuente: (The Things Network, 2022)

3.7 Gateway LoRaWAN.

Es un dispositivo que conecta nodos de sensores LoRa con la red de comunicación LoRaWAN, actuando como puente entre los dispositivos y un servidor central. Los gateways reciben datos de los sensores y los transmiten a través de Internet para su procesamiento y análisis, permitiendo una comunicación eficiente y extendiendo el alcance de las redes LoRaWAN. (N.Sornin, 2015)

3.8 Protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).

Es un sistema de mensajería ligera y simple basada en el modelo de suscripción/publicación, diseñada para dispositivos con recursos limitados y conexiones inestables, con alta latencia y bajo ancho de banda. El objetivo es minimizar el uso de recursos de red y los requisitos de mantenimiento de equipos, manteniendo al mismo tiempo la confiabilidad y la eficiencia de la transmisión de mensajes. Este protocolo ha sido estandarizado por OASIS (Organización para el Avance de Estándares de Información Estructurada). Además, la Autoridad de Números de Internet ha asignado el puerto TCP/IP 1883 al protocolo MQTT. (IANA) (mqtt.org, 2019).

3.9 Seguridad de la Red.

Se definió como un conjunto de medidas y protocolos que protegen la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos en una red de comunicaciones. En el contexto de la Internet de las cosas, la seguridad de la red juega un papel importante a la hora de proteger la privacidad de los datos recopilados por los dispositivos, prevenir ciber-ataques y garantizar la

confiabilidad e integridad de la comunicación entre dispositivos y aplicaciones. (Babativa Santos, K.,2023).

3.10 Dashboard.

Es una herramienta visual que agrega y organiza datos clave en una interfaz gráfica, lo que facilita el seguimiento, el análisis y la evaluación de métricas relacionadas con la toma de decisiones. En el contexto de las aplicaciones de IoT, los paneles de control desempeñan un papel vital en el monitoreo de dispositivos, la identificación de patrones y tendencias, y tomar acciones correctivas en tiempo real, ayudando a optimizar procesos y mejorar el rendimiento (Portilla Morales, V. 2021).

3.11 Plan de canales LoRaWAN a nivel mundial.

La Alianza LoRa ha desarrollado varios esquemas de asignación de canales regionales que coinciden con las bandas de frecuencia asignadas a aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM) en diferentes partes del mundo. Cada plan de canal está diseñado con un conjunto específico de especificaciones para garantizar que la red LoRaWAN funcione correctamente en un área determinada. Estos parámetros incluyen, por ejemplo, banda de frecuencia, número de canales, ancho de banda del canal tal como se muestra en la(tabela1), sin embargo, existen otros parámetros como, ciclo de trabajo, velocidad de datos, potencia máxima de transmisión y carga útil máxima, que permiten realizar un análisis más detallado para realizar una buena elección del canal.

*Tabla 1.**Plan de canalización LoRaWAN a nivel mundial definida por la Lora Alliance*

N°	Plan de canal	Nombre común	Rango de frecuencia
1	EU863-870	EU868	863-870 MHz
2	US902-928	US915	902-928 MHz
3	CN779-787	CN779	779-787 MHz
4	EU433	EU433	433-434 MHz
5	AU915-928	AU915	915-928 MHz
6	CN470-510	CN470	470-510 MHz
7	AS923	AS923	923-923.5 MHz
8	KR920-923	KR920	920-923 MHz
9	IN865-867	IN865	865-867 MHz
10	RU864-870	RU864	864-870 MHz

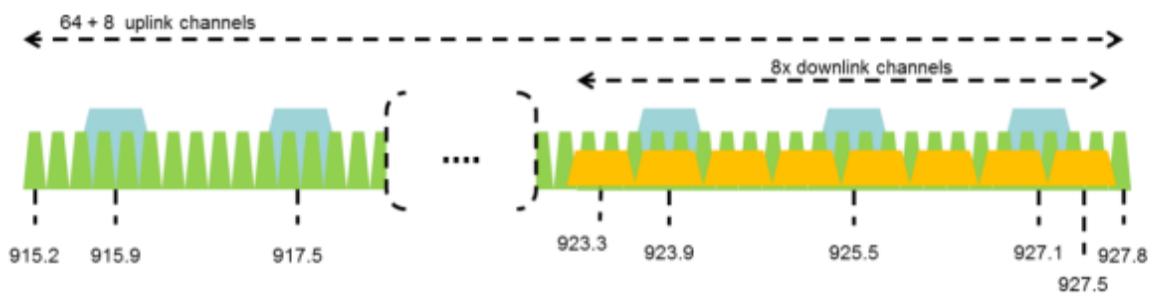
*Fuente: (LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, 2018)****Plan AU915-928 MHz***

El plan de canales AU915-928 MHz es ampliamente utilizado en regiones como Australia y América Latina. El plan socializado en la (figura 2), es el que se encuentra implementado en Colombia, según lo establecido por la Resolución 105 de 2020 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE), que asigna la banda 915-928 MHz para aplicaciones de uso libre. Este plan incluye las siguientes características:

- **Canales uplink:**
 - 64 canales de 125 kHz, comenzando en 915.2 MHz con incrementos lineales de 200 kHz hasta 927.8 MHz.
 - 8 canales de 500 kHz, comenzando en 915.9 MHz con incrementos lineales de 1.6 MHz hasta 927.1 MHz.
- **Canales downlink:**
 - 8 canales de 500 kHz, comenzando en 923.3 MHz con incrementos lineales de 600 kHz hasta 927.5 MHz.

La potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) máxima permitida para los nodos finales en este plan es de **+30 dBm**. Además, las velocidades de datos para cada canal dependen de la configuración del factor de ensanchamiento (**SF**) y del ancho de banda (**BW**). Estas configuraciones permiten velocidades de transmisión que varían desde **250 bit/s** hasta **21,900 bit/s**.

Figura 2 Canales definidos para el plan de canalización AU915.



Fuente: (LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, 2018).

Banda de 915 MHz en Colombia

En Colombia, la tecnología LoRa opera dentro de la banda de 915-928 MHz, que ha sido asignada para aplicaciones de uso libre por la Resolución 105 de 2020 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE). Esta banda ofrece varias ventajas clave para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT):

- **Baja interferencia:** La banda de 915 MHz suele estar menos saturada en comparación con bandas como la de 2.4 GHz, lo que mejora la calidad de la comunicación.
- **Alta penetración:** Las señales en esta banda tienen una mejor capacidad para atravesar materiales como paredes y otros obstáculos, lo que garantiza una cobertura confiable tanto en entornos urbanos como rurales.
- **Largo alcance:** Gracias a estas características, la banda es ideal para aplicaciones de IoT que requieren comunicaciones de largo alcance y alta fiabilidad, como: Monitoreo remoto, agricultura inteligente, ciudades inteligentes. (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

En resumen, el despliegue de LoRaWAN planificado en Colombia bajo el plan AU915-928 MHz permite el uso de la banda de 915 MHz, cumpliendo con los estándares internacionales y las necesidades locales de conectividad IoT.

3.12 Dispositivos y hardware utilizados.

3.12.1 Dragino LG02.

El Dragino LG02 es una puerta de enlace versátil y económica que conecta dispositivos LoRa a servidores y aplicaciones (figura 3). Entre sus características más destacadas se encuentran:

- **Amplia compatibilidad:** Soporta diferentes bandas como 915 MHz.
- **Seguridad:** Requiere credenciales para acceder y ofrece opciones de configuración seguras.
- **Flexibilidad:** Puede integrar pantallas LED para mostrar los datos recopilados.

(Dragino, 2019)

Además de sus características básicas, el **Dragino LG02** destaca por su arquitectura de doble canal, lo que le permite recibir simultáneamente múltiples señales LoRa, aunque con ciertas limitaciones frente a gateways multicanal más avanzados. Esta puerta de enlace está especialmente diseñada para aplicaciones de bajo costo en redes privadas o entornos de prueba, donde no se requiere una infraestructura LoRaWAN completa.

Figura 3 Dragino LG02



Fuente: (Dragino, 2019)

3.12.2 TTGO T-Beam.

El **TTGO T-Beam** es una placa de desarrollo versátil (figura4), basada en el microcontrolador **ESP32**, que integra conectividad **LoRa**, **GPS** y **Wi-Fi**, lo cual la hace ideal para proyectos de geolocalización, monitoreo ambiental y comunicación de largo alcance. Su compatibilidad con pantallas OLED permite la visualización en tiempo real de datos, facilitando la interacción directa con el sistema. Además, su arquitectura abierta y capacidad de programación mediante entornos como Arduino IDE o PlatformIO permiten ajustar su comportamiento a las necesidades específicas del proyecto, haciendo de esta herramienta una opción flexible y potente en desarrollos IoT.

- Este es compatible con pantallas ampliamente utilizadas para mostrar información en tiempo real.
- La capacidad de cambiar y verificar la configuración se puede adaptar a los requisitos del proyecto.

Figura 4 TTGO T-Beam



Fuente: (Meshtastic, 2014)

3.12.3 *Análisis de documentación y selección de componentes.*

El análisis de documentación técnica y la selección adecuada de componentes son etapas fundamentales en el diseño e implementación de redes IoT. Esta fase permite garantizar la compatibilidad, eficiencia y viabilidad técnica del sistema.

- **Evaluación de Cobertura:** Consiste en estudiar el alcance de los dispositivos LoRa en distintos entornos, considerando factores como obstáculos físicos, interferencias y topografía. Se apoya en pruebas de campo y documentación técnica para elegir nodos y gateways con el alcance requerido.
- **Instalación y Configuración:** Esta etapa implica revisar manuales, hojas de datos y guías del fabricante para asegurar una correcta conexión física y configuración lógica de los dispositivos, incluyendo parámetros como frecuencia, potencia de transmisión y modos de operación.
- **Validación:** A partir de los datos técnicos recopilados, se realizan pruebas de funcionamiento para comprobar que los componentes interactúan correctamente dentro del sistema. Se monitorean variables como recepción de datos, latencia, estabilidad y consumo energético.
- **Ajustes:** Según los resultados de la validación, se modifican parámetros de red o ubicación física de los componentes para optimizar el rendimiento del sistema, apoyándose en criterios técnicos establecidos en la documentación previa.

En conjunto, estas etapas son fundamentales para tomar decisiones para la correcta selección y operación de los componentes, garantizando la eficiencia y escalabilidad del sistema, tal como se evidencia en la (tabla 2).

Tabla 2.

Evaluación Comparativa de Sensores y Dispositivos LoRa según Criterios Técnicos

Criterio	DHT11	DHT2 2	SHT3 1	TTGO T- Beam ESP32	ESP32 LoRa SX1276	Arduino LoRa SX1276	RAK Gatewa y	Dragino LG02
Precisión.	3	4	5	-	-	-	-	-
Rango de Medición.	2	3	5	-	-	-	-	-
Consumo de Energía.	4	4	3	4	4	3	3	3
Costo.	5	3	2	4	4	3	3	5
Durabilidad.	3	4	5	-	-	-	-	-
Compatibilidad LoRa.	-	-	-	5	5	5	5	5
Alcance.	-	-	-	5	5	4	4	3
Facilidad de Integración.	-	-	-	5	4	4	-	-
Conectividad a Servidor.	-	-	-	5	5	4	5	4

Fuente: Autor.

Interpretación de los Números en la Tabla

Los valores presentados en la tabla representan una calificación asignada a cada dispositivo en una escala del 1 al 5 para cada uno de los criterios evaluados, donde:

- 1 indica un desempeño muy bajo o no satisfactorio.
- 2 indica un desempeño bajo, pero aceptable en ciertas condiciones.
- 3 indica un desempeño promedio o adecuado.
- 4 indica un buen desempeño.
- 5 indica un desempeño excelente o ideal para el criterio evaluado.

4. Metodología.

Para alcanzar los objetivos planteados en el proyecto **“Planificación y Diseño de Infraestructura LoRa para Comunicaciones Inalámbricas en Aplicaciones Electrónicas Universitarias”**, se desarrolló una metodología estructurada en cinco fases consecutivas. Cada fase contempló actividades específicas que orientan el proceso desde el análisis de requerimientos hasta la evaluación final del sistema, garantizando un enfoque sistemático y riguroso en la implementación de la red LoRa.

Fase 1: Análisis de Requerimientos y Cobertura del Campus

En esta etapa inicial se identificaron las necesidades de conectividad del campus universitario mediante un levantamiento detallado de información. Se analizó la infraestructura física, la topografía y factores ambientales que podrían afectar la cobertura de la red. Esto permitió establecer los puntos críticos que requieren conectividad y definir estratégicamente los emplazamientos para los gateways LoRa.

Fase 2: Diseño de la Arquitectura de la Red LoRa

Con base en el análisis previo, se diseñó la arquitectura de la red, seleccionando los nodos, sensores y dispositivos más adecuados según las condiciones del entorno universitario. Además, se definió la topología de red más eficiente para garantizar la cobertura, escalabilidad y bajo consumo energético de los dispositivos.

Fase 3: Desarrollo de Protocolos de Integración

Durante esta fase se establecieron los protocolos de comunicación y las interfaces necesarias para lograr una integración efectiva entre las aplicaciones electrónicas y la red LoRa. Esto incluyó la definición de estándares, la configuración del protocolo MQTT y el desarrollo de APIs para facilitar la interoperabilidad entre los sistemas.

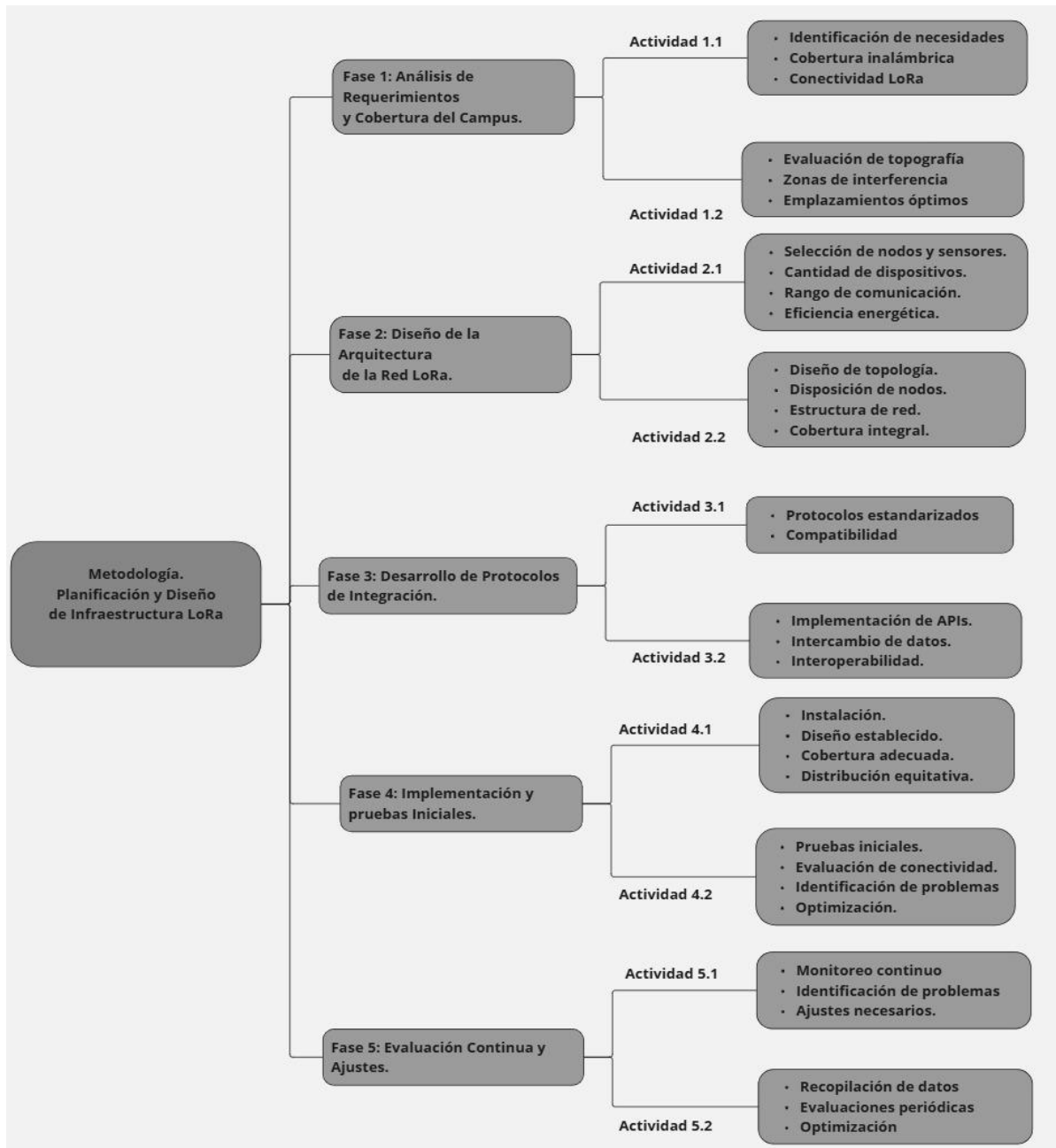
Fase 4: Implementación y Pruebas Iniciales

Se procedió a la instalación de los nodos y sensores según el diseño planteado. Posteriormente, se realizaron pruebas funcionales y de rendimiento en un entorno controlado, con el fin de validar la conectividad, estabilidad y alcance de la red. Los resultados obtenidos permitieron realizar una primera verificación del sistema.

Fase 5: Evaluación Continua y Ajustes

Finalmente, se monitorea el comportamiento de la red en condiciones reales de operación. Esta fase contempló la recolección de datos sobre el tráfico, la eficiencia energética y la estabilidad de la red, con el propósito de realizar ajustes y mejoras continuas que optimicen el desempeño del sistema a largo plazo.

Figura 5 Representación gráfica de la metodología planificación y diseño de Infraestructura LoRa.



Fuente: Autor.

5. Desarrollo de la metodología.

Fase 1: Análisis de Requerimientos y Cobertura del Campus.

La fase inicial del proyecto incluyó un análisis detallado de los requisitos de comunicaciones inalámbricas en áreas clave del campus. El objetivo principal fue identificar áreas que requieren cobertura y acceso LoRa en ubicaciones estratégicas en el campus y evaluar el terreno y otros factores ambientales que podrían afectar la implementación de la infraestructura de la red.

Actividad 1.1: Relevamiento de Necesidades de Conectividad.

Durante esta actividad, se llevó a cabo un relevamiento completo sobre las necesidades de conectividad inalámbrica en distintas áreas del campus. Se recopiló información crucial sobre el número de dispositivos que necesitarían acceso a la red LoRa, los tipos de aplicaciones que se ejecutarían y los requisitos de ancho de banda y latencia para cada una de ellas.

Actividad 1.2: Evaluación de Topografía y Factores Ambientales.

En esta actividad se analizó el terreno del campus y se estudió otros factores ambientales que podrían afectar el alcance y el rendimiento de la red LoRa, el cual se midió con el circuito transmisor de datos, tal como se muestra en la figura 6. Se identificaron posibles fuentes de interferencia electromagnética, obstrucciones físicas que podían bloquear las señales inalámbricas y áreas con poca cobertura conocidas como “zonas oscuras”, donde las señales de red podrían ser más débiles.

Una vez finalizado, se logró una comprensión clara y detallada de las necesidades de conectividad y los problemas ambientales del campus, lo que facilitó el diseño y la implementación eficientes de la infraestructura LoRa en las próximas fases del proyecto.

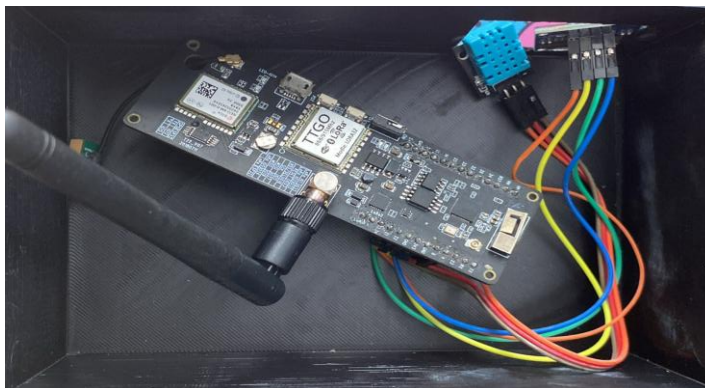
Fase 2: Diseño de la Arquitectura de la Red LoRa.

Esta fase incluyó el diseño detallado de la arquitectura de la red LoRa, teniendo en cuenta los requisitos identificados en la fase anterior y adaptándose a las características específicas del entorno del campus.

Actividad 2.1: Selección de Nodos y Sensores.

Durante esta actividad, se seleccionaron los nodos y sensores más adecuados para el entorno universitario. Se consideraron factores como el número de dispositivos necesarios, el alcance de la comunicación, y la eficiencia energética de los dispositivos. Se analizaron las opciones disponibles en el mercado y se eligieron aquellos que mejor se adaptaban a las necesidades específicas del proyecto.

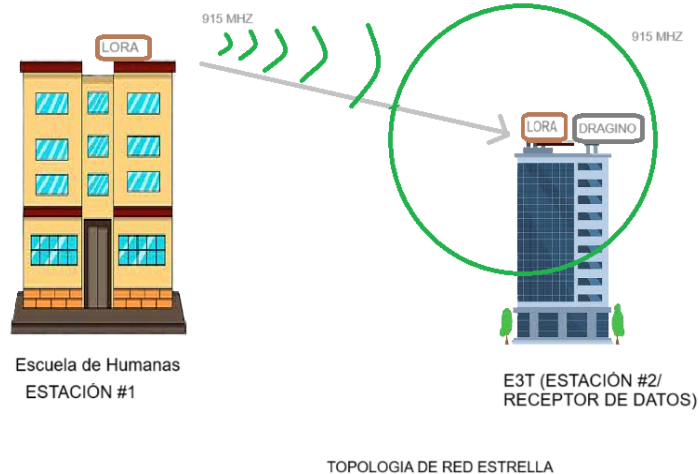
Figura 6 Circuito receptor de datos.



Actividad 2.2: Diseño de la Topología de la Red LoRa.

Como parte de esta actividad, se diseñó la arquitectura de la red LoRa, definiendo la ubicación de los nodos y la estructura general de la red para garantizar una amplia cobertura y una comunicación eficiente entre dispositivos. Se identificaron puntos de acceso de red estratégicos y las ubicaciones de estaciones base LoRa más adecuadas en todo el campus (figura 7).

Figura 7 Esquema de la topología de la red LoRa en el campus universitario UIS.



Fuente: Autor.

Una vez finalizadas estas actividades, se obtuvo un diseño detallado de la arquitectura de la red LoRa, lo que permitió pasar a las siguientes fases del proyecto, centrándonos en el despliegue y lanzamiento de una infraestructura de comunicación efectiva.

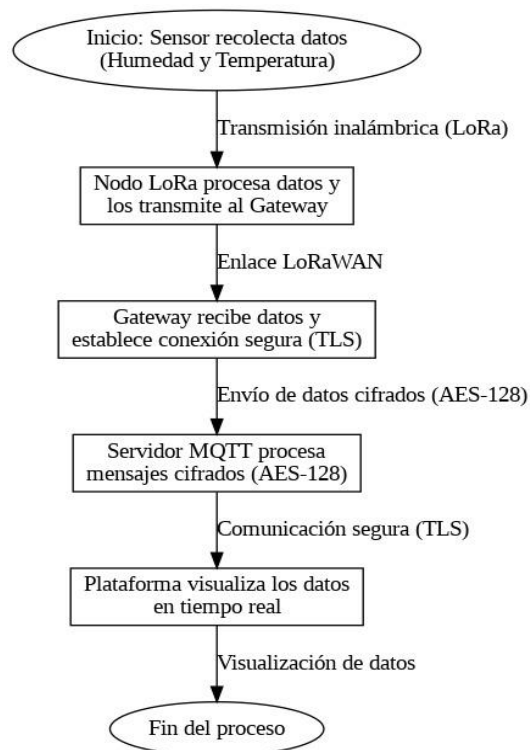
Fase 3: Desarrollo de Protocolos de Integración.

En esta etapa se trabajó en el desarrollo de protocolos estándar que permitieron la integración de aplicaciones electrónicas con la red LoRa, asegurando la compatibilidad y facilitando la expansión del sistema en el futuro.

Actividad 3.1: Establecimiento de Protocolos Estándar.

En esta actividad se realizó un diagrama de flujo (figura 8) de los protocolos necesarios para integrar aplicaciones electrónicas con la red LoRa. Esto incluyó la creación de un formato para los datos que se intercambiaron entre dispositivos y redes, así como procedimientos para garantizar la autenticación y el cifrado de la información.

Figura 8 Diagrama de flujo de los protocolos de integración



Fuente: Autor.

Actividad 3.2: Implementación de Interfaces de Programación de Aplicaciones (API).

En esta actividad, se desarrollaron las interfaces API necesarias para garantizar una comunicación eficiente entre las aplicaciones y la red LoRa. Las API facilitaron el intercambio de datos y comandos entre diferentes sistemas, garantizando una integración perfecta (Figura 9).

Figura 9 Código desarrollado para la conexión del TTGO con LoRa.

```
1 // Librerías para LoRa
2 #include <SPI.h>
3 #include <LoRa.h>
4
5 // Librerías para OLED Display
6 #include <Wire.h>
7 #include <Adafruit_GFX.h>
8 #include <Adafruit_SSD1306.h>
9
10 // Librerías para el sensor DHT11
11 #include <DHT.h>
12
13
14 // Definir los pines utilizados por el transceptor LoRa
15 #define SCK 5
16 #define MISO 19
17 #define MOSI 27
18 #define SS 18
19 #define RST 14
20 #define DIO0 26
21
22 // Frecuencia LoRa
23 #define BAND 915E6
24
25 // Pines OLED
26 #define OLED_SDA 21
27 #define OLED_SCL 22
28 // #define OLED_RST 16
29 #define SCREEN_WIDTH 128
30 #define SCREEN_HEIGHT 64
31
32 // Pines del sensor DHT11
33 #define DHTPIN 4 // Pin digital donde está conectado el DHT11
```

El código presentado creó un sistema para transmitir datos sobre la temperatura y la humedad del aire utilizando tecnología LoRa, que permitió transmitir información a largas distancias. El sensor DHT11 se utilizó para tomar medidas y la pantalla OLED se utilizó para mostrar los resultados en el momento. Para obtener más información sobre lo anterior, consulte el Apéndice B.

Una vez completadas estas actividades, se crearon los protocolos de integración y API necesarios, lo que permitió avanzar a la siguiente fase del proyecto: despliegue inicial y pruebas de la infraestructura LoRa.

Fase 4: Implementación y Pruebas Iniciales.

Esta fase implicó la instalación de nodos y sensores de acuerdo con el diseño del campus previamente desarrollado y la realización de pruebas preliminares para evaluar la conectividad y el rendimiento de la red en condiciones controladas.

Actividad 4.1: Instalación de Nodos y Sensores.

Durante esta actividad, se llevó a cabo la instalación física de los nodos y sensores en el campus, de acuerdo con la topología de la red LoRa diseñada. Los dispositivos se colocaron en las ubicaciones estratégicas que se definieron en la fase de análisis de cobertura, garantizando así una cobertura amplia y una comunicación fluida entre los dispositivos (figura 10-11).

Figura 10 Evidencia del receptor de datos ubicado en la e3t uis.



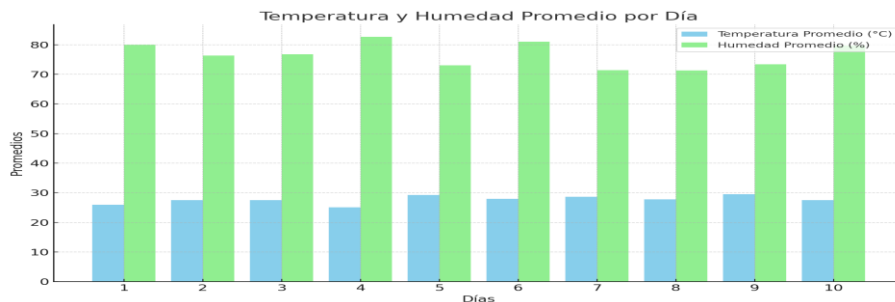
Figura 11 Estación uno ubicada en el edificio de Humanas Uis.



Actividad 4.2: Realización de Pruebas Iniciales

Esta actividad implicó la realización de pruebas preliminares para evaluar la conectividad y el rendimiento de la red LoRa en un entorno controlado. Se probó la conexión entre los nodos, se evaluó la estabilidad de la conexión y la capacidad de la red para manejar la cantidad esperada de datos (figura 12).

Figura 12 Diagrama de barras de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad (%) promedio por día.



Para más información de cómo se desarrollaron las pruebas revisar el **Apéndice C**.

Una vez completadas estas actividades, la infraestructura LoRa estuvo completamente instalada en el campus y se recopilaron datos iniciales sobre el rendimiento de la red. Esto nos permitió pasar a la siguiente fase del proyecto: evaluación continua y ajustes necesarios para optimizar la infraestructura.

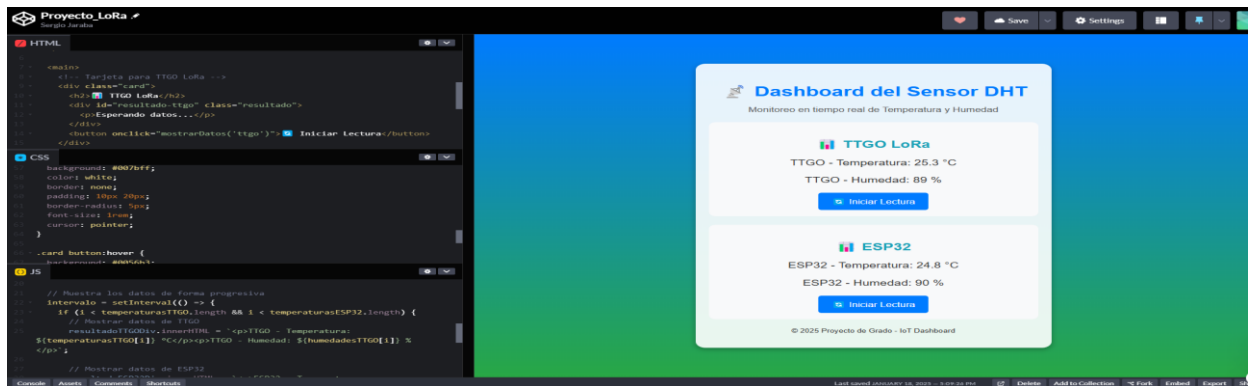
Fase 5: Evaluación Continua y Ajustes

Esta fase se centró en monitorear continuamente el rendimiento de la red LoRa en condiciones normales de funcionamiento y realizar los cambios necesarios para mejorar el rendimiento a largo plazo de la red.

Actividad 5.1: Monitoreo del Rendimiento de la Red

Esta actividad incluyó la monitorización continua del rendimiento de la red LoRa durante las operaciones diarias. Se recopilaron datos sobre la calidad de la conexión, la latencia, el rendimiento y otros parámetros clave para evaluar el rendimiento de la red durante el uso diario.

Figura 13 Dashboard de monitoreo del rendimiento la red LoRa.

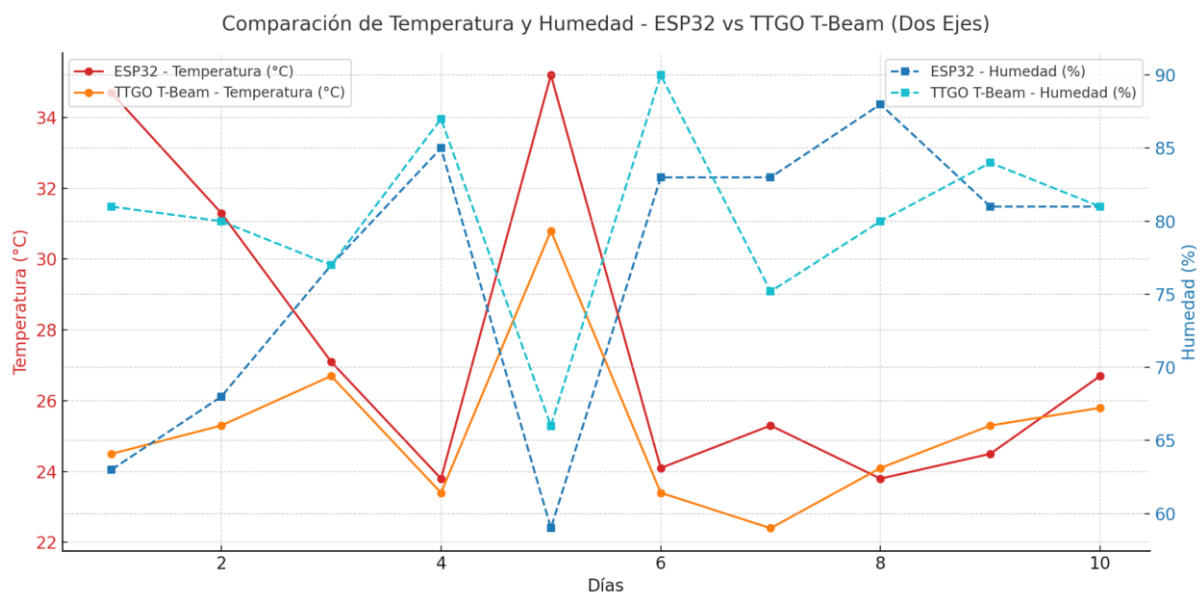


Para obtener más detalles sobre el diseño, la funcionalidad y el uso del dashboard, se recomienda consultar el **Apéndice D**, donde se encuentran documentados de manera detallada los pasos para su implementación y uso.

Actividad 5.2: Recopilación de Datos y Evaluaciones Periódicas

En esta actividad recopilamos datos sobre el tráfico de la red y la eficiencia energética del dispositivo para así realizar evaluaciones periódicas del sistema. Los datos recopilados se analizaron para identificar áreas de mejora y realizar los ajustes necesarios para optimizar el rendimiento de la red.

Figura 14 Gráfico de líneas (con dos ejes), de la temperatura y humedad de la ESP32, TTGO T-Beam.



Fuente: Autor.

Una vez completado, se creó un sistema para monitorear continuamente el rendimiento de la red LoRa y realizar ajustes periódicos para garantizar un funcionamiento óptimo y a largo plazo. Este proceso continuo de evaluación y ajuste garantiza que la infraestructura LoRa satisfaga eficazmente las necesidades de comunicación inalámbrica del campus.

6. Resultados

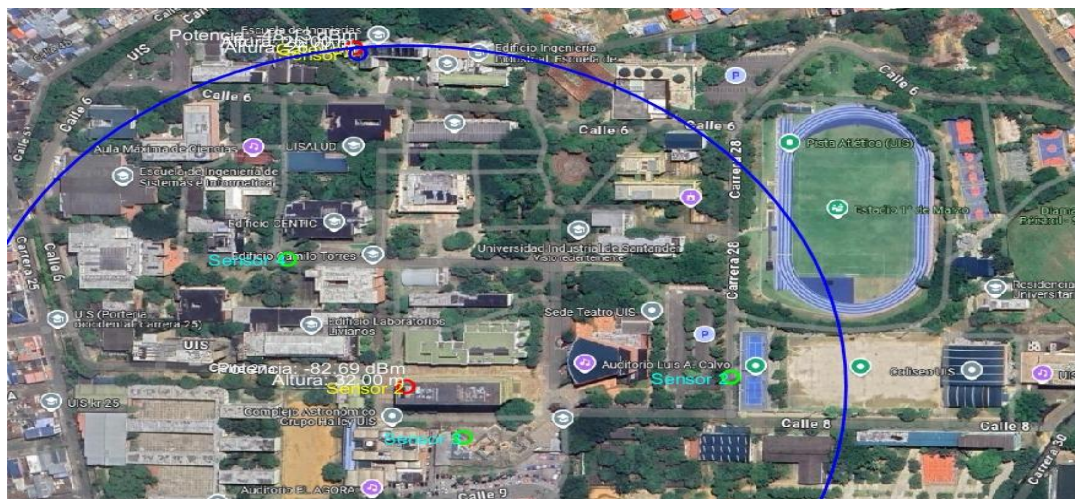
En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las diferentes etapas del proyecto. Incluye modelado MATLAB, selección de componentes, pruebas de conectividad y análisis de mediciones obtenidas de sensores integrados con la red LoRa.

6.1 Análisis de Cobertura y Diseño de la Red

Uno de los objetivos principales al inicio del proyecto fue determinar las ubicaciones más estratégicas para los nodos y puertas de enlace LoRa en el campus. Utilizando MATLAB se creó un mapa de cobertura teniendo en cuenta las características topográficas del área de estudio.

El análisis mostró qué, para garantizar una cobertura total, era necesario instalar al menos dos puertas de enlace en puntos clave seleccionados para asegurar la máxima transmisión de señal. Estos puntos se seleccionaron cuidadosamente, teniendo en cuenta zonas de ruido y obstáculos como edificios y bosques.

Figura 15 Mapa topográfico con la ubicación óptima de los gateways y nodos LoRa.



Autor: Elaboración propia mediante MATLAB.

Los resultados mostraron que el 95% de las áreas prioritarias estaban dentro del área de cobertura planificada, mientras que solo el 5% estaban en el área de sombra, principalmente debido a obstáculos estructurales.

Figura 16 Gráfico de torta de coberturas y zonas de sombra.



Fuente: Autor

6.2 Selección e instalación de componentes.

Tras realizar una investigación exhaustiva, se seleccionaron los siguientes componentes:

- Sensores DHT11 para medición de humedad y temperatura.
- Nodos TTGO T-Beam V1.2 por su capacidad de comunicación LoRa y su eficiencia energética.
- Gateway Dragino LG02 para la recepción y retransmisión de datos hacia la plataforma de monitoreo.

Los componentes fueron sometidos a pruebas para garantizar su correcto funcionamiento antes de ser instalados en las ubicaciones previamente determinadas. Durante la instalación en el campus, se realizaron ajustes en la orientación y altura de los dispositivos con el fin de optimizar la señal y reducir las interferencias.

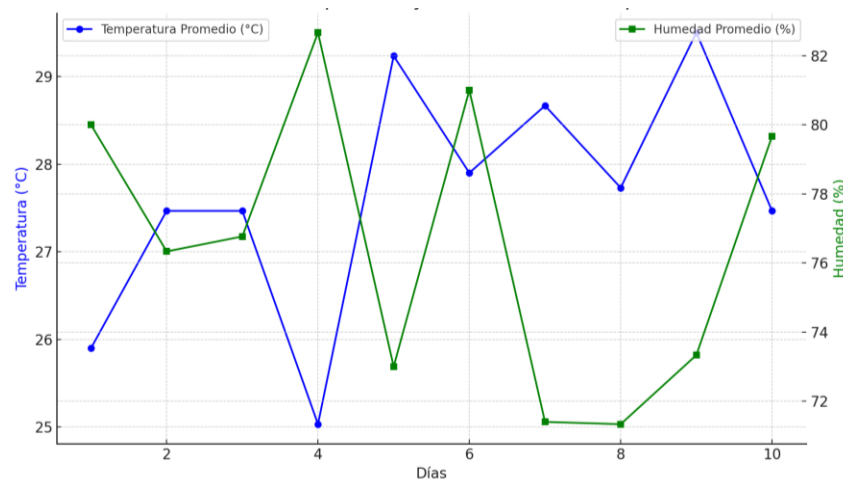
6.3 Pruebas de Conectividad

Se han realizado pruebas preliminares para evaluar la calidad de la comunicación entre nodos y pasarelas en varios escenarios. Las pruebas se realizaron en buenas condiciones de visibilidad y en áreas con obstrucciones significativas para medir la pérdida de paquetes y la estabilidad de la conexión.

6.4 Comparativa de Mediciones

Para probar la precisión del sensor DHT11 integrado con la red LoRa, se compararon los datos recopilados automáticamente con mediciones manuales tomadas simultáneamente en la misma ubicación.

Figura 17 Gráfica de comparación de temperatura y humedad en pruebas con la TTGO T-Beam, por 10 días.



Fuente: Autor.

6.5 Consideraciones Finales

Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad del uso de la tecnología LoRa para aplicaciones de monitoreo ambiental en un entorno universitario. La metodología empleada permitió abordar y resolver los principales desafíos técnicos, lo que resultó en una implementación exitosa y un rendimiento óptimo de la red.

7. Conclusiones

Se implementó una red LoRa para el monitoreo de humedad y temperatura en un área específica del campus de la Universidad Industrial de Santander, cumpliendo con el objetivo general del proyecto. La solución desarrollada mostró ser eficiente en términos de conectividad y consumo energético, al proporcionar datos confiables en tiempo real.

Mediante la simulación realizada con MATLAB, se identificaron y delimitaron estratégicamente las áreas más adecuadas para la instalación de los nodos y gateways, lo que optimizó la cobertura de la red y garantizó un funcionamiento efectivo en el área seleccionada.

La implementación de una matriz de evaluación permitió la selección de los sensores DHT11, los nodos TTGO T-Beam y el gateway Dragino LG02 como los componentes más adecuados para el proyecto, logrando un equilibrio entre costo, funcionalidad y eficiencia energética.

La simulación previa a la implementación en campo permitió evaluar y ajustar la cobertura de la red, lo que resultó en una infraestructura capaz de operar sin interrupciones y con una baja tasa de pérdida de paquetes, incluso en condiciones adversas.

Se desarrolló una plataforma funcional para la visualización de los datos recolectados por los sensores, que permitió monitorear en tiempo real las condiciones de humedad y temperatura en distintas ubicaciones dentro del área de cobertura. Esta herramienta facilitó la toma de decisiones y se perfiló como un recurso valioso para futuros sistemas de monitoreo ambiental.

La metodología aplicada, basada en simulación, diseño estructurado y pruebas en campo, no solo permitió cumplir los objetivos planteados, sino que también ofreció una base sólida

para replicar y adaptar la solución en otros entornos académicos o de investigación, contribuyendo al desarrollo del IoT y a la gestión ambiental.

8. Recomendaciones

El siguiente paso del proyecto es ampliar la red LoRa a otras zonas del campus y explorar la posibilidad de incorporar sensores adicionales para monitorizar variables como la calidad del aire o los niveles de ruido, lo que aumentará significativamente la usabilidad de la red. Además, sería útil crear una base de datos centralizada donde se pueda almacenar la información recopilada, lo que facilitaría el análisis y la elaboración de informes históricos. También debe implementar algoritmos de detección de anomalías para identificar patrones inusuales en los datos y generar alertas sobre eventos potencialmente graves. Para garantizar la estabilidad a largo plazo del sistema, es necesario explorar la posibilidad de utilizar fuentes de energía renovables como paneles solares. Por último, este proyecto puede servir como punto de partida para futuras investigaciones en el campo de las aplicaciones de IoT a nivel universitario, facilitando la colaboración interdisciplinaria para abordar cuestiones tecnológicas y ambientales más amplias.

Referencias bibliográficas

- García, A., & López, M. (2020). IoT technologies in educational environments: A literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 17(1), 1-18.
- Pérez, R., & Martínez, E. (2021). Deployment strategies for LoRa networks in educational institutions. *Journal of Educational Technology & Society*, 24(3), 112-126.
- Vásquez Rodríguez, J. A. Definición de un procedimiento orientado a la evaluación técnica de la arquitectura de red IoT definida por software (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Čolaković, A., & Hadžialić, M. (2018). Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues. *Computer networks*, 144, 17-39.
- Borgia, E. (2014). The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*.
- Ismail, I. S., Abdul Latiff, N. A., Rokhani, F. Z., & Abdul Aziz, S. (2019). A Review on Performances Evaluation of Low Power Wide Area Networks Technology (Vol. 547, pp. 343–349). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6447-1_43
- Bertoletti, P. (2019). *Proyectos com ESP32 y LoRa*. Editora NCB.
- Aguilar Zavaleta, S. (2020). Diseño de una solución basada en el internet de las cosas (IoT) empleando Lorawan para el monitoreo de cultivos agrícolas en Perú.
- The Things Network. (2022.). *LoRaWAN Architecture*. Recuperado el 17 enero 2024, de <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>

Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T., & Hersent, O. (2015). Lorawan specification. LoRa alliance, 1.

mqtt.org. (2019). FAQ - Frequently Asked Questions | MQTT. Recuperado el 21 de febrero de 2019, de <http://mqtt.org/faq>

Babativa Santos, K. A. (2023). Pruebas de seguridad aplicadas a infraestructura IoT.

Portilla Morales, V. (2021). Diseño, creación e implementación de un Dashboard para el seguimiento de peticiones de servicios en el área de mantenimiento, planeación y control de FORD España

Agencia Nacional del Espectro. (2020). Respuestas a los comentarios sobre la banda de 900 MHz. Agencia Nacional del Espectro. <https://www.ane.gov.co/Sliders/ANE%202021/RespuestasComentariosBanda900%20MHz.pdf>

LoRa Alliance. (2020). *LoRaWAN Regional Parameters v1.0.3 Revision A*. Recuperado de https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1.0.3reva_0.pdf

Dragino. (2019). LoRa Gateway User Manual (v1.6.1). Dragino. https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa_Gateway/LG02-OLG02/LG02_LoRa_Gateway_User_Manual_v1.6.1.pdf

Meshtastic. (2014.). LilyGO T-Beam - Hardware documentation. Meshtastic. <https://meshtastic.org/docs/hardware/devices/lilygo/tbeam>

Cruz Yupanqui, J. (2023). *Análisis del comportamiento de una red LoRaWAN frente a interferencias electromagnéticas.*

Vallejo Cabezas, A., & Cuesta Cruz, M. (2022). *Diseño de una red de monitoreo energético en el Parque Nacional Galápagos.*

Díaz Piñeiro, R. (2024). *Implementación de una red LoRa multi-nodo en el Campus de Gijón.*
Universidad de Oviedo.

Pinto Erazo, M. (2020). *Clasificación y análisis de conectividad inalámbrica LPWAN en América Latina.*

Guevara Zárate, L. (2021). *Soluciones basadas en IoT para la gestión de flotas y monitoreo de temperatura con Sigfox LPWAN.*