



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN CURRICULAR
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**“DESARROLLO DE UN ENTORNO DE PRUEBAS CONTROLADO PARA EL
ESTUDIO DE REDES IOT LORA IMPLEMENTADO EN EL LABORATORIO DE
TELECOMUNICACIONES DE FACSISTEL”.**

AUTORES

SOTO LA ROSA ROBERT ISAAC

YAGUAL LAÍNEZ JOSÉ EMILIO

TUTOR

ING.DANIEL JARAMILLO CHAMBA, Mgtr.

LA LIBERTAD-ECUADOR

DECLARACIÓN DEL DOCENTE TUTOR

En mi calidad de docente tutor del trabajo de integración curricular denominado: “**Desarrollo de un entorno de pruebas controlado para el estudio de redes IoT LoRa implementado en el laboratorio de Telecomunicaciones de FACSISTEL**” elaborado por **Soto La Rosa Robert Isaac y Yagual Laínez José Emilio**, estudiantes de la carrera de telecomunicaciones; Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de ingeniería en Telecomunicaciones, me permito declarar que, tras supervisar el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos. En consecuencia, lo considero apto en todos sus aspectos y listo para ser evaluar por el docente especialista.

Atentamente



Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr

DOCENTE TUTOR

DECLARACIÓN AUTORÍA DE LOS ESTUDIANTES

El presenta trabajo de Integración Curricular con el título “**Desarrollo de un entorno de pruebas controlado para el estudio de redes IoT LoRa implementado en el laboratorio de Telecomunicaciones de FACSISTEL**”, declaramos que la concepción, análisis y resultados son originales a la actividad educativa en el área de Telecomunicaciones.

Atentamente



Soto La Rosa Robert Isaac

C.I. 2400255309



Yagual Láinez José Emilio

C.I. 2450416835

DECLARACIÓN DE DOCENTE ESPECIALISTA

En mi calidad de Docente Especialista del Trabajo de Integración Curricular, **“Desarrollo de un entorno de pruebas controlado para el estudio de redes IoT LoRa implementado en el laboratorio de Telecomunicaciones de FACSISTEL”** elaborado por **Soto La Rosa Robert Isaac y Yagual Láinez José Emilio**, estudiantes de la Carrera de Telecomunicaciones, Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniería en Telecomunicaciones, me permito declarar que, tras supervisar el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos. En consecuencia, lo considero apto en todos sus aspectos y listo para la sustentación del trabajo.

Atentamente



Ing. Manuel Montaña Blacio, M. Sc

DOCENTE ESPECIALISTA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph.D.

DIRECTOR DE LA CARRERA



Ing. Manuel Montaña Blacio, M. Sc

DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.

DOCENTE TUTOR GUÍA



Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.

DOCENTE GUIA UIC



Ing. Corina Gonzabay De La A, Mgtr

SECRETARIA

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Quienes suscriben, **SOTO LA ROSA ROBERT ISAAC** con **C.I. 2400255309** y **YAGUAL LAÍNEZ JOSÉ EMILIO** con **C.I. 2450416835**, estudiantes de la carrera de Telecomunicaciones, declaramos que el trabajo de Titulación presentado a la unidad de Integración Curricular cuyo tema es “**Desarrollo de un entorno de pruebas controlado para el estudio de redes IoT LoRa implementado en el laboratorio de Telecomunicaciones de FACSISTEL**”, corresponde y es de exclusiva responsabilidad de los autores y pertenece al patrimonio intelectual de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Atentamente



Soto La Rosa Robert Isaac

C.I. 2400255309



Yagual Láinez José Emilio

C.I. 2450416835

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado a mi familia y amigos más cercanos, cuyo amor incondicional y apoyo desinteresado me alentaron a seguir esforzándome y a no rendirme ante el abrumador estrés estudiantil por el que pasamos la mayoría de los estudiantes de ingeniería. En especial, a mi madre que, a pesar de mis muchos errores, me alentó a seguir adelante por el buen camino, inculcándome a creer en mí mismo y que el único que podía ponerme límites era yo. Su ayuda me mantuvo firme a pesar de las adversidades y el tiempo que me tomaría alcanzar mis metas.

No puedo olvidarme de mi compañero de tesis y amigo Emilio yagual, que me acompañó en este largo camino de querer ser un profesional. Aunque tuvimos muchas dificultades pudimos seguir avanzado para llevar el tema hasta el final.

Por último, pero no menos importante, a Gissell Miranda, la mujer que me acompañó en este camino de crecimiento continuo y me dio una hermosa hija. Ellas me han motivado a buscar ser la mejor versión de mí mismo.

Robert Isaac Soto La Rosa

Primeramente a Dios, quien es la fuente de sabiduría y guía en cada paso de este camino académico, por brindarme la fortaleza y esperanza en los momentos difíciles dentro de todo este tiempo.

A mis padres, Hugo Yagual y Patricia Laínez, cuyo amor inquebrantable, sacrificio y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental de mi formación. A mi pareja Rudy Rodríguez, mi hermano Patricio por ser siempre mi motivación para lograr mis metas.

A mis amigos y familiares, quienes, con su compañía, comprensión y ánimo inquebrantable, han hecho más ligera esta travesía.

Sin la presencia y contribución de cada uno de ustedes en mi vida, este logro no hubiera sido posible. A todos, les dedico este éxito con mucha gratitud y afecto.

José Emilio Yagual Laínez

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, mi más profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, Daniel Jaramillo, por su invaluable guía, apoyo incondicional y por compartir su vasto conocimiento a lo largo de todo el proceso. Su dirección fue fundamental para la culminación exitosa de esta investigación.

Agradezco también a la UPSE por brindar los recursos y el entorno propicio para el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, a mi familia y amigos por su constante aliento, paciencia y comprensión durante esta etapa tan importante. Su apoyo personal fue una fuente inagotable de motivación.

Robert Isaac Soto La Rosa

Agradezco a Dios por su amor y bondad que han estado conmigo en cada paso de mi trayectoria académica, su guía ha sido mi luz en los momentos oscuros y su gracia ha sido mi fuerza. También quiero agradecer a mis padres y hermanos por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi fuente de inspiración en cada paso que he dado.

A mi tutor el Ing. Daniela Jaramillo por su dedicación, paciencia y sabios consejos que han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo, su orientación y conocimiento han sido invaluable.

Agradezco a mi compañero y amigo, Robert Soto, por su colaboración, aliento y amistad durante este proyecto y a lo largo de nuestro proceso académico.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte fundamental en la culminación de este proyecto.

José Emilio Yagual Laínez

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad desarrollar un entorno de pruebas controlado para redes LoRaWAN en el laboratorio de telecomunicaciones de la FACSISTEL, con el propósito de evaluar el comportamiento de esta tecnología bajo diferentes condiciones de operación. Se utilizaron dos nodos Heltec LoRa 32 V3: uno orientado a la simulación de variables ambientales (temperatura y humedad) y otro a variables de seguridad (presencia, distancia y corriente), comunicándose a través de un gateway Heltec HT-M02 V2 con la red pública The Things Network (TTN) y la visualización de datos se realizó en la plataforma Ubidots.

Se realizan pruebas en tres escenarios: línea de vista, interiores con atenuación y zonas alejadas con obstrucciones, además se evalúan parámetros clave como el Spreading Factor, ancho de banda y potencia de transmisión, analizando su impacto en la calidad de señal, cobertura y consumo energético, también se introdujo un nodo interferente (TTGO T3) para probar la resiliencia de la red.

Los resultados demuestran que la configuración SF7–BW125–20 dBm es la más eficiente en entornos controlados, además se documenta una guía técnica del gateway y se proponen prácticas de laboratorio para futuras investigaciones.

Palabras clave: LoRa, LoRaWAN, IoT, TTN, Ubidots, interferencia, SF, consumo energético, gateway Heltec, redes LPWAN.

ABSTRACT

The purpose of this project is to develop a controlled test environment for LoRaWAN networks in the FACSISTEL telecommunications laboratory, in order to evaluate the behavior of this technology under different operating conditions. Two Heltec LoRa 32 V3 nodes were used: one oriented to the simulation of environmental variables (temperature and humidity) and the other to security variables (presence, distance and current), communicating through a Heltec HT-M02 V2 gateway with the public network The Things Network (TTN) and the data visualization was performed in the Ubidots platform.

Tests are performed in three scenarios: line of sight, indoor with attenuation and remote areas with obstructions, in addition to evaluating key parameters such as Spreading Factor, bandwidth and transmission power, analyzing their impact on signal quality, coverage and power consumption, also an interfering node (TTGO T3) was introduced to test the resilience of the network.

The results show that the SF7-BW125-20 dBm configuration is the most efficient in controlled environments, a technical guide of the gateway is documented and laboratory practices are proposed for future research.

Keywords: LoRa, LoRaWAN, IoT, TTN, Ubidots, interference, SF, energy consumption, Heltec gateway, LPWAN networks.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DEL DOCENTE TUTOR	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
DECLARACIÓN DE DOCENTE ESPECIALISTA	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	iii
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	iv
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
ÍNDICE DE DIAGRAMA DE FLUJO	xv
ÍNDICE DE FIGURA	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	2
1. Generalidades de la propuesta	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Descripción del proyecto	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Justificación del proyecto	6
1.5. Alcance del proyecto	6
1.6. Metodología	7
1.7. Resultados esperados.....	9
CAPITULO II.....	11
2. Fundamentos teóricos.....	11
2.1. Internet de las cosas (IoT).....	11
2.1.1. Arquitectura y protocolos IoT.....	11
2.2. Redes LPWAN.....	12
2.2.1. SIGFOX.....	13
2.2.2. LoRaWAN	13
2.2.3. NB-IoT.....	13
2.3. Tecnología LoRa.....	15
2.3.1. Modulación LoRa	15
2.3.2. Bandas de frecuencias LoRa	16
2.4. Componentes hardware dentro de una Red LoRa.....	16
2.4.1. Microcontroladores en IoT.....	17

2.5.	Radios LoRa	18
2.5.1.	Componentes clave para un módulo LoRa	19
2.6.	Placas de desarrollo con módulo LoRa.....	20
2.6.1.	Heltec LoRa 32.....	21
2.7.	Interfaz microcontrolador-radio	22
2.7.1.	Librerías LoRa.....	22
2.8.	Protocolos de comunicación	23
2.8.1.	Protocolo LoRaWAN	23
2.8.2.	Protocolo MQTT	24
2.8.3.	Comparativa LoRaWAN y MQTT	26
2.9.	Parámetros de configuración y su impacto en el rendimiento	26
2.9.1.	Spreading Factor.....	27
2.9.2.	Potencia de transmisión	28
2.9.3.	Impacto en la Cobertura	28
2.9.4.	Consumo Eléctrico	28
2.9.5.	Regulaciones y Cumplimiento	29
2.9.6.	Ancho de banda	29
2.9.7.	Frecuencia de Transmisión (Duty Cycle).....	29
2.10.	Calidad de la señal y cobertura	30
2.10.1.	Pérdida de trayectoria	30
2.10.2.	Interferencias.....	30
2.10.3.	Ruido.....	31
2.10.4.	Métricas de calidad de señal	32
2.11.	Consumo energético y optimización de la batería.....	34
2.11.1.	Técnicas de ahorro de energía.....	34
2.11.2.	Modelos de consumo y predicción de vida de la batería	34
2.12.	Análisis de datos y optimización de la red.....	35
2.12.1.	Optimización de Parámetros	35
2.12.2.	Monitoreo de Redes en Tiempo Real.....	36
CAPÍTULO III.....		38
3.	Definición del entorno de pruebas.....	38
3.1.	Objetivo del entorno de pruebas	38
3.1.1.	Hardware y software utilizados.....	38
3.1.2.	Criterios de evaluación	44
3.1.3.	Configuración de The Things Network (TTN)	45
3.1.4.	Integración con herramientas externas	47
3.2.	Diseño del escenario de monitoreo IoT para condiciones Ambientales y Seguridad	50
3.2.1.	Variables a simular: Densidad y ubicación de nodos	51
3.2.2.	Condiciones ambientales y factores de seguridad	52
3.3.	Configuración de parámetros críticos de la Red LoRa.....	53

3.3.1.	Spreading factor, Potencia de transmisión y ancho de banda.....	53
3.3.2.	Impacto de los parámetros en el desempeño.....	54
3.4	Diseño de pruebas para evaluar calidad de señal y cobertura.....	55
3.4.1.	Calidad de señal en diferentes ubicaciones	56
3.5	Pruebas de resiliencia frente a interferencias y ruido.....	61
3.5.1.	Evaluación de interferencias en la Red LoRa.....	61
3.5.2.	Estrategias para Mitigación de Interferencias.....	63
3.6	Implementación de pruebas para evaluar consumo de energía.....	64
3.6.1.	Impacto de configuraciones de transmisión en el consumo de batería	65
CAPÍTULO IV.....		69
4.	Análisis y resultados del entorno de pruebas LoRaWAN.....	69
4.1.	Evaluación de desempeño de red en el escenario de monitoreo IoT.....	69
4.1.1.	Resultados en el escenario 1	70
4.1.2.	Resultados en el Escenario 2.....	71
4.1.3.	Resultados en el escenario 3	72
4.2.	Análisis del impacto de parámetros de transmisión en la red LoRa.....	73
4.2.1.	Comportamiento del enlace según SF, potencia y ancho de banda	74
4.3.	Análisis de calidad de señal y cobertura	75
4.3.1.	RSSI y SNR en función de la ubicación y evaluación de cobertura	75
4.4.	Resiliencia ante interferencias y ruido.....	77
4.4.1.	Efecto de nodo interferente (TTGO T3 V1.6.1) sobre la Red LoRa.....	78
4.4.2.	Estrategias para mitigación de interferencias.....	78
4.5.	Evaluación del consumo energético.....	79
4.5.1.	Consumo según Spreading Factor, Potencia y Frecuencia de Envío	79
4.5.2.	Estrategias de Ahorro energético y vida útil de los dispositivos	80
4.6.	Análisis de datos y visualización en plataforma TTN + Ubidots	81
4.6.1.	Escenario ambiente.....	81
4.6.2.	Escenario seguridad.....	84
4.7.	Manual de uso del Gateway LoRaWAN Heltec HT-M02 V2	86
4.7.1.	Descripción técnica del dispositivo.....	87
4.7.2.	Instrucciones de configuración y uso	87
4.7.3.	Prácticas de laboratorio para el uso del Heltec HT-M02	91
CONCLUSIONES		93
RECOMENDACIONES.....		94
ANEXOS.....		95
BIBLIOGRAFIA.....		97

ÍNDICE DE DIAGRAMA DE FLUJO

Diagrama 1. Metodología	8
--------------------------------------	---

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Imagen Conceptual de IoT (PNGkey, 2022).....	11
Figura 2. Logo de Sigfox (Shopify, 2024).	13
Figura 3. Logo de LoRaWAN (Muñoz, 2019).....	13
Figura 4. Logo de NB- IoT (Reales IoT, 2025).....	14
Figura 5. Chirp Spread Spectrum (Wikipedia, 2025).....	15
Figura 6. Diagrama de bloques de un microcontrolador (PICmicro, 2020).....	17
Figura 7. Hardware Heltec LoRa 32 (AliExpress, 2025)	21
Figura 8. Capas de protocolo LoRa (Venco, 2022).....	24
Figura 9. Logo The Things Network (Wifx, 2021)	36
Figura 10. Logo Mosquitto (Beaton, 2021).....	37
Figura 11. Heltec-T-M02 Edge LoRa Gateway (V2) (AliExpress V. , 2024).....	38
Figura 12. Lilygo LoRa32 V2.1_1.6 (Lilygo, 2024).....	40
Figura 13. Heltec WiFi LoRa 32 (V3) (Lilygo, 2025)	41
Figura 14. The Things Network (TTN) (LoRa Alliance, 2024)	42
Figura 15. OPNET LoRa (Jun, y otros, 2017).....	42
Figura 16. UBIDOTS (Capterra, 2022).....	43
Figura 17. Registro de la Aplicación en TTN	45
Figura 18. Incorporación de Dispositivos - Ambiente	46
Figura 19. Incorporación de Dispositivos - Seguridad	46
Figura 20. Configuración del Gateway	47
Figura 21. Interfaz de nodo de ambiente.....	48
Figura 22. Interfaz de nodo de seguridad	49
Figura 23 Esquema del Escenario de Ambiente.....	51
Figura 24 Esquema del Escenario de Seguridad	51
Figura 25. Conexiones de dispositivo para el nodo de ambiente.....	52
Figura 26. Conexiones de los dispositivos para el nodo de seguridad.....	53
Figura 27. Intensidad de señal (RSSI) y relación señal-ruido (SNR)	54
Figura 28. Análisis de áreas sin obstáculo	56
Figura 29. Análisis de áreas con obstáculo	58

Figura 30. Rincones o lugares lejos desde el punto de acceso	59
Figura 31. Datos antes de interferencia.	62
Figura 32. Resultados del nodo interferente.....	62
Figura 33 Sensor ACS712 a Nodo Heltec LoRa 32 V3	66
Figura 34 Ubicación de Equipos.....	69
Figura 35. Comparación de calidad de señal por tipo de entorno.....	77
Figura 36. Captura de paquetes desde Gateway Lora Heltec m02 v2	82
Figura 37. Captura de paquetes desde TTN	82
Figura 38. Conexión con UBIDOTS- ambiente	83
Figura 39. Dashboard de UBIDOTS - ambiente	83
Figura 40. Captura de paquetes desde Gateway Lora Heltec m02 v2- seguridad.....	84
Figura 41. Captura de paquetes desde TTN- seguridad.....	84
Figura 42. Conexión con UBIDOTS - seguridad.	85
Figura 43. Dashboard de UBIDOTS- Seguridad.....	86
Figura 44. Red - HT-M02-AP.....	88
Figura 45. Interfaz Web.....	89
Figura 46. Agregar Gateway a TTN.	89
Figura 47. Registro en TTN.	90
Figura 48. Registrar el Gateway	90
Figura 49. Configuración del Gateway.	91
Figura 50. Interfaz en TTN del Gateway.	91
Figura 51 Nodo Ambiente Funcionando.....	95
Figura 52 Nodo Seguridad Funcionando	95
Figura 53 Gateway Heltec Funcionando.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de tecnologías LPWAN.	14
Tabla 2. Lista de frecuencias LoRa.....	16
Tabla 3. Comparativa de diferentes familias de microcontroladores.....	18
Tabla 4. Comparativa: LoRaWAN vs. MQTT.....	26
Tabla 5. Tiempo de Transmisión Spreading Factor.....	27
Tabla 6. Especificaciones Heltec-T-M02 Edge LoRa Gateway (V2).....	39
Tabla 7. Comparación entre Lilygo 32 V2.1_1.6 y WiFi LoRa 32 (V3).....	41
Tabla 8. Análisis de cada parámetro para el escenario sin obstáculo.....	57
Tabla 9. Análisis de cada parámetro para el escenario con obstáculo.....	58
Tabla 10. Análisis de cada parámetro para el escenario lejano.....	60
Tabla 11. Resultados de los tres escenarios.....	61
Tabla 12. Consumo energético de los componentes principales.....	65
Tabla 13. Consumo Energético para Configuraciones de Transmisión LoRa.....	67
Tabla 14. Resultados en el escenario 1: Línea de vista directa.....	71
Tabla 15. Resultados en el escenario 2: Interiores con Atenuación Moderada.....	72
Tabla 16. Resultados en el escenario 3: Zonas alejadas y con obstrucciones.....	73
Tabla 17. Resultados de Spreading Factor (SF).....	74
Tabla 18. Resultados de Bandwidth (BW).....	75
Tabla 19. Resultados Potencia de Transmisión (TX).....	75
Tabla 20. RSSI y SNR en Función de la Ubicación y evaluación de cobertura.....	76
Tabla 21. Consumo según Spreading Factor, Potencia y Frecuencia de Envío.....	80
Tabla 22. Tabla comparativa de estrategias de ahorro energético.....	80
Tabla 23. Características Técnicas del Gateway Heltec HT-M02 V2.....	87

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Relación Señal-Ruido.....	33
Ecuación 2. Tasa de Error de Bits.....	33

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

IoT: Internet de las cosas

LoRa: Largo alcance

LPWAN: Red de área amplia de baja potencia

CSS: Espectro ensanchado de chirrido

API: Interfaz de programación de aplicaciones

LoRaWAN: red de área amplia de largo alcance

MQTT: Transporte de telemetría de cola de mensajes

SF: Factor de propagación

BW: Ancho de banda

RSSI: Intensidad de la señal recibida

SNR: Relación señal - ruido

BER: Tasa de error de bits

TX Power: Potencia de transmisión

CRC: Comprobación de redundancia cíclica

TOA: Tiempo en el aire

DevEUI: Identificador único del dispositivo

AppEUI: Identificador de la aplicación

AppKey: Clave para la autenticación y cifrado

INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas han tenido un gran impacto en nuestra sociedad, cambiado la forma en que nos comunicamos y nos conectamos con el mundo. Su despliegue ha permitido el desarrollo de nuevas tecnologías de comunicaciones, fomentado la creación de nuevas aplicaciones y servicios, como el IoT, que hacen uso de conectividad inalámbrica para conectar dispositivos a Internet.

Si tuviéramos tecnología capaz de recopilar datos y comprender "cosas" sin intervención humana, podríamos vigilar, contar y ubicar todo lo que nos rodea, sabiendo cuándo reemplazar, reparar o recuperar lo que sea necesario, así como entender cómo funciona. “El Internet de las Cosas tiene el potencial para cambiar el mundo tal y como hizo la revolución digital hace unas décadas. Tal vez incluso hasta más”.

IoT tiene mucho que ofrecer por su infinidad de aplicaciones posibles, sin embargo. Para este estudio se analizará esta tecnología para conectar dispositivos a larga distancia, haciendo uso de LoRa. Esta nos permite que los dispositivos conectados se comuniquen a larga distancia con bajo consumo de energía. Se utiliza una banda de frecuencia en específico para la transmisión de señales de radio, permitiendo un mayor alcance comparado a otros tipos de tecnologías inalámbricas como lo son Wi-Fi y Bluetooth, esto sería ideal para aplicaciones de IoT en áreas remotas de difícil acceso, como un ejemplo claro, los sensores en el campo o dispositivos que monitorean infraestructuras. La combinación de LoRa e IoT permiten el desarrollo de soluciones con baja potencia e incluso en bajo costo para las aplicaciones comunes como monitoreo ambiental, seguridad, controles de accesos, seguimientos de activos y automatización para procesos industriales.

El estudiar el funcionamiento de una tecnología antes de usarla ayuda a obtener resultados precisos que brinden un mejor desempeño ideales para conectar dispositivos IoT debido a su gran alcance, bajo consumo de energía y alta eficiencia espectral. Sin embargo, es importante tener en cuenta los desafíos y la necesidad de contar con una infraestructura adecuada para soportar un gran número de dispositivos conectados.

CAPITULO I

1. Generalidades de la propuesta

1.1. Antecedentes

Al hablar del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés: Internet of Things), hacemos referencia a la interconexión que mantiene dispositivos físicos con el Internet, lo que les permite recopilar, intercambiar y procesar información. El campo de IoT tiene un crecimiento rápido, logrando impactar en la industria y en el mercado de consumo, su despliegue promete revolucionar la forma en que vivimos, al utilizar dispositivos los cuales pueden ser nodos y sensores simples hasta equipos con una mayor complejidad permitirán mejorar a mayor escala la capacidad de respuesta y a su vez la eficiencia en diversas aplicaciones, superando desafíos comunes que existen en otros tipos de tecnología (Díez B & Heras V, 2022).

IoT es caracterizado por la accesibilidad que tiene al permitir conectar grandes cantidades de dispositivos de una manera más segura, eficiente y escalable, los dispositivos más comunes en esta tecnología son los sensores y actuadores, dispositivos portátiles y cámaras en donde se pueden dispersar en diferentes puntos geográficos. La mayoría de estos dispositivos finales se encuentran en zonas en donde el cableado físico da un costo mayor, por lo que esta comunicación inalámbrica sería una solución clave (Faludi, 2021).

En la actualidad se han desarrollado una variedad de tecnologías sobre comunicaciones inalámbricas, cada una de ellas nos presenta diferentes tipos de aplicaciones optimizadas como lo son:

Wi-Fi, siendo una de las principales tecnologías de redes inalámbricas que utiliza ondas de radio que permite conexiones de redes a Internet con una gran velocidad sin la necesidad de cables físicos. Una desventaja que presentan las redes Wi-Fi en la dificultad que suele presentar para mantener conexiones constantes con el router, debido a un alcance limitado, además de contar con un consumo elevado de energía (Angulo C & Rivera M, 2023).

Entre las diferencias que existen entre Wi-Fi y las conexiones por cable Ethernet, es que se transmite datos por medio de ondas de radio frecuencia que va entre 2.4 GHz y 5 GHz, estas frecuencias disponen de una serie de canales para que los dispositivos operen inalámbricamente, ayudando a distribuir cargas y evitando que los paquetes de datos sean saturado o interrumpidos por cualquier otro tipo de tráfico (Cajas T, 2022).

Bluetooth es un protocolo de comunicación de corto alcance en donde los dispositivos que se comunican a través de esta tecnología pueden transmitir datos a distancias que varían desde un metro hasta 100 metros, dependiendo de la clase de potencia, al igual que Wi-Fi, utiliza ondas de radio (generalmente a 2,4 GHz) como medio de transmisión de datos. Es un estándar de comunicación relativamente seguro, ideal para soluciones móviles en las que no se requiere un alto rendimiento de datos. Sus características distintivas son su corto alcance y su bajo consumo de energía (Angulo C & Rivera M, 2023).

ZigBee fue desarrollado en el año 2004, siendo una de las alternativas entre Wi-Fi y Bluetooth, su principal característica es que presenta un bajo nivel de consumo energético para redes inalámbricas con topología en malla que pueden durar incluso años, además de una tasa de bits que se reduce entre 20 a 250 Kbit/s adecuado para las aplicaciones IoT pero sin transferencias de datos intensivas, una desventaja es su rango de operación que se encuentra limitado entre 10 a 20 metros de distancia. A pesar de estas limitaciones, la naturaleza en malla del protocolo permite que las redes ZigBee escalen a más de 100 metros si hay múltiples nodos. Sin embargo, ZigBee es menos común que BLE (Bluetooth de Baja Energía) y Wi-Fi, dado que pocos dispositivos lo soportan y sus costos de licencia son más altos, lo que ha restringido su adopción en aplicaciones para consumidores (Angulo C & Rivera M, 2023).

Dado que los requisitos para las redes IoT inalámbricas son diferentes y plantean nuevos desafíos, se desarrolló una nueva clase de red inalámbrica:

Las Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN) son una de las soluciones más atractivas presentadas para las diversas aplicaciones existentes para redes IoT, a diferencia de tecnologías inalámbricas como Wi-Fi y Bluetooth, que ofrecen una mayor tasa de transferencia de datos pero con una distancia limitada, en cambio, LPWAN se destaca por el bajo consumo de energía que mantiene pero a su vez nos permite la transferencia a una mayor distancia, siendo ideal para que los dispositivos finales de IoT puedan operar durante largos periodos de tiempo con baterías, además de cubrir grandes áreas de trabajo.

Sin embargo, es importante destacar que, a pesar de contar con todas estas ventajas, todavía no se puede considerar como una solución única, debido a que existen aplicaciones que requieren de altas tasas de transferencia con una baja latencia, por ejemplo, cámaras de seguridad que requieren presentar imágenes en tiempo real, en donde la opción más clara es usar redes Wi-Fi con 5G. Las LPWAN se enfocan en la transmisión de paquetes de

datos eficientes y confiables, lo que las convierte en una opción ideal para aplicaciones como monitoreo y gestión de actividades industriales (Carrasco G, 2020).

LoRa es una tecnología LPWAN, su nombre se abrevia de “Long Range” o “Largo Alcance” que va desde los 10 a 20 Km con una baja tasa de transferencia de datos de hasta 255 bytes. Se caracteriza por permitir que los dispositivos finales transmitan y reciban datos de manera eficiente a una baja velocidad de datos.

Esta tecnología trabaja en la capa física que modula las señales en la banda ISM sub-GHZ en donde se utiliza una técnica de espectro ensanchado patentado. Al igual que Sigfox, LoRa usa bandas ISM sin licencia, es decir, 868 MHz en Europa, 915 MHz en América del Norte (Frecuencia usada en Ecuador) y 433 MHz en Asia. La comunicación bidireccional se proporciona por la modulación de espectro ensanchado chirp (CSS) que propaga señales de banda estrecha sobre un ancho de banda de canal más amplio. La señal que llega a su destino cuenta con bajos niveles de ruido, lo que permite una alta interferencia resiliencia, y es difícil de detectar (Díez B & Heras V, 2022).

Se utilizan seis factores de dispersión (SF7 a SF12) para adaptar la compensación de velocidad de datos y rango. Un factor de dispersión más alto permite rango más largo a expensas de una tasa de datos más baja, y viceversa.

1.2. Descripción del proyecto

LoRa como tecnología inalámbrica cuenta con una variedad de ventajas comparadas a otras tecnologías, una de ellas es la facilidad que tiene al usarse, cuenta con una baja barrera de entrada y su bajo costo de instalación. Además, es escalable y se puede utilizar para conectar un gran número de dispositivos y sensores sin la necesidad de una infraestructura de red costosa y compleja (Martinez A, 2024). Siendo estos, puntos claves que nos llevaron a contribuir con el estudio de esta tecnología aportando con equipamiento de ayuda para futuros trabajos.

Este proyecto busca diseñar e implementar un entorno de pruebas para investigar el comportamiento de redes IoT LoRa bajo distintas configuraciones. Con la manipulación sistemática de parámetros clave, se analizará el impacto en el rendimiento de la red, identificando las mejores prácticas de configuración y optimizar el funcionamiento de estos sistemas.

Se implementará una red de nodos con sensores administrados por un Gateway en el laboratorio de telecomunicaciones de la UPSE, en donde el Gateway nos ayudará con la gestión

y monitoreo a través de una plataforma mediante el uso de su conexión a la red. El equipo, que recibe y procesa los datos de los nodos, da las herramientas de control, nos facilitará el manejo de parámetros diferentes para su configuración para el respectivo análisis de rendimiento.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Desarrollar un entorno de pruebas controlado para evaluar el impacto de diversos parámetros de configuración de redes LPWAN LoRa, con el fin de evaluar y optimizar su desempeño en diferentes escenarios de aplicación y contribuir con el estudio de comunicaciones IoT.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar las funciones y características principales de una red LoRa, conocer sus principales plataformas de simulación, gestión y monitoreos de datos existentes en el mercado para cada tipo de aplicación IoT.
- Desarrollar un entorno para pruebas escalables, simulando escenarios distintos de despliegue de una red LoRa, en donde se consideren las variables de densidad y la ubicación para cada nodo dentro del laboratorio de telecomunicaciones.
- Evaluar el rendimiento de la red LoRa variando los siguientes parámetros: Spreading Factor, Potencia de Transmisión y Ancho de Banda para identificar como afectan la latencia, tasa de pérdida de los paquetes y el consumo energético de los dispositivos finales.
- Medir y analizar la calidad de la señal en ubicaciones diferentes, con barreras físicas y distancias consideradas que afectarían el rendimiento de la red LoRa para determinar la ubicación del Gateway y de los nodos con el fin de mejorar la cobertura y minimizar zonas muertas.
- Examinar el funcionamiento de la red LoRa ante posibles ruidos e interferencias del entorno o provocadas, evaluando la capacidad de la red de mantener la transmisión de datos estable y confiable ante entornos adversos, medir como afectarían la calidad de la señal para el desarrollo de estrategias que permitan mitigar los efectos posibles por interferencia.
- Evaluar configuraciones diferentes para la transmisión de datos y estrategias para la gestión del consumo energético de baterías y dispositivos operativos dentro de la red para prolongar la vida útil de los dispositivos y nodos finales.

- Analizar los datos obtenidos de las evaluaciones para el desarrollo de un modelo que nos permita optimizar el rendimiento de la red bajo diferentes configuraciones, proponiendo una configuración óptima de parámetros para la red implementada.
- Elaborar un manual sobre el manejo del Gateway LoRa Heltec M02 V2 como guía de prácticas para el laboratorio de telecomunicaciones de FACSISTEL.

1.4. Justificación del proyecto

La creciente adopción del Internet de las Cosas (IoT) ha aumentado la necesidad de tecnologías de comunicación de bajo consumo y largo alcance, como LoRa. El despliegue de la red presenta aun desafíos para una buena optimización debido a la complejidad de los parámetros de configuración que necesita, además de los entornos de operación (Hernández C, 2020).

El presente proyecto se basa en desarrollar un entorno controlado para pruebas y configuraciones que permitan mitigar esta problemática y analizar el rendimiento de la red LoRa en diferentes escenarios. Al crear un entorno de pruebas configurable, se podrá evaluar los siguientes factores, tales como el Spreading Factor (SF), tasa de transmisión y potencia de transmisión para optimizar el rendimiento de la red en función de las aplicaciones.

Los resultados obtenidos permitirán evaluar y optimizar redes LoRa e identificar las mejores prácticas para el diseño y despliegue de las mismas, en diferentes escenarios de aplicación. Con esto, se busca mejorar la calidad de servicios y reducir costos de operación optimizando así el uso de los recursos. Se puede destacar que la implementación de este tema puede facilitar la implementación de esta tecnología en nuevos escenarios de aplicación como también en el uso de nuevas técnicas y protocolos para redes LoRa al estar se alineado con las tendencias actuales del mercado, respondiendo a las necesidades de un sector en constante crecimiento.

1.5. Alcance del proyecto

Este proyecto se centrará en la implementación de una red IoT basada en tecnología LoRa en un entorno de pruebas con el fin de realizar un estudio de rendimiento, considerando el impacto de diferentes parámetros de configuración, para cumplir con los objetivos que se han planteado se llevará a cabo las siguientes actividades:

- Verificar información de la tecnología LoRa y de los softwares que permitan la simulación, monitoreo y gestión de la red identificando cada una de sus funciones.

- Implementar un banco de pruebas que permita evaluar la red, además de seleccionar los equipos que se utilizarán como el Gateway, nodos LoRa y dispositivos finales.
- Para la comparación de parámetros se planteará la existencia de dos escenarios mismos que simularemos gráficamente en el software SKETCHUP y OPNET++ para la simulación de la red.
- Se identificarán los parámetros de configuración clave como la potencia de transmisión, ancho de banda, frecuencia de operación, tasa de datos, entre otros, para el análisis dentro del entorno experimental.
- Estos datos proporcionarán una guía para la configuración de redes LoRa en aplicaciones específicas de IoT, dando recomendaciones y futuras prácticas con el fin de optimizar el rendimiento de la red según las necesidades dentro del entorno implementado.
- Los entornos de pruebas implementados en el laboratorio aportarán material práctico para futuros proyectos de los estudiantes de la carrera de telecomunicaciones abordando las materias de Microcontroladores, Comunicaciones Inalámbricas, Redes de Última Generación (NGN).

Cabe destacar, que los resultados de este proyecto pueden no ser directamente extrapolables a entornos reales más complejos y que, aunque el banco de pruebas se diseñará para ser escalable, su capacidad máxima estará limitada por los recursos disponibles.

1.6. Metodología

El presente proyecto implica un desarrollo físico al referirnos a la implementación de una red IoT LoRa, por consiguiente, la metodología de investigación experimental sería la más adecuada, se detalla en el siguiente diagrama de flujo.

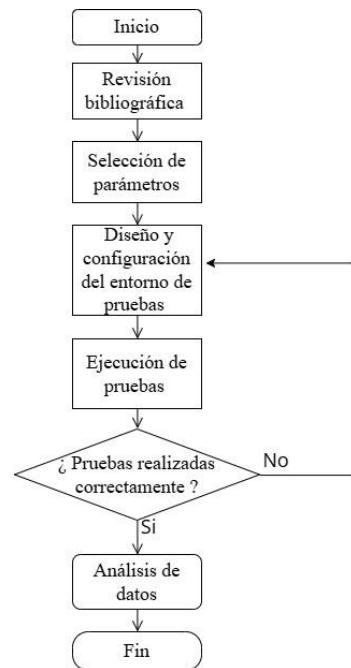


Diagrama 1. Metodología

Esta metodología se centra en la manipulación controlada de variables para poder observar los efectos dentro de un sistema, en el caso del proyecto estas variables estarían dadas con los parámetros de configuración de la red LoRa, y el sistema sería la red IoT que se esté evaluando.

Para el desarrollo del proyecto se lleva a cabo una metodología experimental que se estructura en diferentes fases, con el fin de cumplir con los objetivos planteados, cada fase se diseña para abordar aspectos claves sobre el rendimiento de una red IoT con tecnología LoRa y configuraciones de ciertos parámetros.

i. Análisis del estado del arte y revisiones bibliográficas

Llevar a cabo un análisis detallado sobre la tecnología LoRa en artículos científicos, para obtener conocimientos sobre los parámetros de configuración que influyan dentro del rendimiento de las redes LoRa.

ii. Diseño y configuración del entorno de pruebas

En esta fase se debe seleccionar y adquirir el hardware necesario incluyendo los nodos LoRa, Gateway y antenas asegurando que sean compatibles y adecuados para el entorno experimental.

iii. Selección y definición de parámetros de configuración

Se debe definir los parámetros de configuración a estudiar, como la potencia en que se transmite, ancho de banda, frecuencia de operación y la tasa de datos en base a la revisión bibliográfica y el estado del arte, además de establecer rangos de valores para cada parámetro, considerando las limitaciones técnicas de los equipos a utilizar como las necesidades de aplicaciones IoT específicas.

iv. Ejecución de las pruebas experimentales

Esta fase nos permite evaluar el impacto de las diferentes configuraciones de parámetros que influyen en el rendimiento de la red LoRa, además de recolectar los datos cuantitativos como consecuente realizar su análisis respectivo.

v. Análisis de los datos

Analizar los datos obtenidos en las pruebas experimentales utilizando herramientas que nos brinden estadísticas que indiquen cómo los diferentes parámetros que condicionen el rendimiento de la red.

vi. Optimización de los parámetros de configuración

Ajustar los parámetros de configuración para mejorar el rendimiento de la red, obteniendo configuraciones estándar y optimizadas.

vii. Desarrollo de recomendaciones y conclusiones

Recomendar prácticas dentro del laboratorio que faciliten el análisis de la red y sirva para futuras guías de implementación en aplicaciones IoT

1.7. Resultados esperados

Se espera obtener como resultado una red estable, robusta y flexible para prácticas como simulación de escenarios de redes LoRa, junto al manual de uso de los equipos utilizados en el proyecto, serviría como una herramienta clave para ejercer pruebas dentro del laboratorio de telecomunicaciones, dirigido a estudiantes que sientan interés en este tipo de tecnología inalámbrica.

A partir de las pruebas que se realizaron dentro de la red, los datos obtenidos permitirán comprender el comportamiento de la red en diferentes escenarios y condiciones. Estos datos serán analizados para identificar las relaciones entre los parámetros de configuración y las métricas de rendimiento clave, como el alcance, la latencia y el consumo energético. Uno de los resultados más tangibles de este proyecto será la elaboración de una guía de configuración

general para redes LoRa. Esta guía proporcionará recomendaciones prácticas sobre cómo optimizar los parámetros de la red en función de los requisitos específicos de cada aplicación, considerando factores como el alcance deseado, la tasa de datos requerida y las restricciones de energía.

Además de la optimización de redes existentes, este proyecto contribuirá a la selección de las plataformas de gestión y monitoreo de redes LoRa más adecuadas para cada tipo de aplicación. A través de un análisis comparativo de las diferentes plataformas disponibles en el mercado, se identificarán aquellas que ofrecen las mejores funcionalidades y se evaluará su capacidad de integración con otros sistemas empresariales.

el acceso a dispositivos y medios de comunicación, así como una integración eficiente dentro de la red global. Este enfoque se sustenta en iniciativas como el proyecto IOT-A (Internet of Things Architecture).

Diversas organizaciones importantes contribuyen significativamente, por ejemplo, IEEE ha trabajado a través del grupo 802.15, en particular con el protocolo IEEE 802.15.4, que posibilita realizar comunicaciones de baja velocidad para dispositivos de bajo costo y con recursos limitados. Por su parte, la IETF ha propuesto soluciones como CoAP (Constrained Application Protocol), diseñado con el objetivo de transferir datos en entornos web, orientado a dispositivos con restricciones de memoria y procesamiento. Otros protocolos relevantes como RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks), 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks), y tecnologías de integración/gestión como SOAP, CORBA y WBEM trabajan en conjunto para crear una arquitectura estándar que permita la interoperabilidad entre dispositivos y servicios IoT (Tonato C & Sinche M, 2022).

Existen opciones que conectan dispositivos de manera inalámbrica a internet, cada una de ellas con sus propias ventajas y desventajas:

- El WiFi es una de las opciones con bajo costo para el dispositivo, pero con un gran consumo energético siendo no ideal para volúmenes altos de datos.
- La conectividad celular (2G, 3G o 4G) también tiene un consumo energético alto y un costo de conectividad a considerar, y no es la opción óptima para grandes volúmenes.
- Otra opción es la tecnología 6LoWPAN, que utiliza una versión reducida de IP versión 6, pero su uso aún es limitado.

Para aplicaciones que requieren un consumo energético muy bajo y costos muy bajos, se pueden utilizar tecnologías de radio de bajo consumo como ZigBee, o protocolos específicos creados para la IoT como Sigfox, LoRa o Weighless, conocidos como redes LPWA (Low Power Wide Area).

2.2. Redes LPWAN

Existen diferentes tecnologías inalámbricas con distintas áreas de cobertura, a estas se las conoce como redes de área amplia y baja potencia (LPWAN). Su enfoque está dado para comunicaciones de dispositivos con baja velocidad de datos. LPWAN ofrecen buena cobertura en áreas urbanas, rurales y remotas de 5 a 40 km. dependiendo de su configuración de hardware y software (Seri, 2024).

Existen varias tecnologías de redes LPWAN, cada una con sus propias características y ventajas. Algunas de las tecnologías más populares son: Sigfox, LoRaWAN y NB-IoT (Narrowband IoT). Estas tecnologías son ideales para aplicaciones de IoT en entornos urbanos y rurales, y ofrecen una amplia cobertura geográfica, una larga vida útil de la batería y un bajo costo de implementación.

2.2.1. SIGFOX

Sigfox es una solución IoT que cuenta con 31 países en asociación y varios operadores en cada país. Sus mensajes no tienen reconocimiento, y cada dispositivo envía los mensajes tres veces en diferentes canales de frecuencia. Las estaciones base reciben mensajes simultáneamente, y el dispositivo final puede elegir un canal al azar para transmitir, lo que reduce la complejidad y el costo (Revelo V & Egas A, 2023).



Figura 2. Logo de Sigfox (Shopify, 2024).

2.2.2. LoRaWAN

LoRaWAN es una tecnología desarrollada por Semtech que utiliza la banda ISM Sub-GHz y proporciona comunicación bidireccional a través de la modulación CSS. Los mensajes transmitidos por un dispositivo son recibidos por varias estaciones base, lo que aumenta el costo de la solución. LoRaWAN puede localizar los dispositivos finales al recibir su mensaje (Sandy C, 2021).



Figura 3. Logo de LoRaWAN (Muñoz, 2019)

2.2.3. NB-IoT

NB-IoT es una tecnología desarrollada por 3GPP que utiliza FDMA en el enlace ascendente y ortogonal FDMA en el enlace descendente con modulación QPSK. NB-IoT puede funcionar con GSM y LTE de tres maneras: de forma independiente utilizando las frecuencias

de GSM, como banda de guarda usando recursos no utilizados en LTE, y dentro de la banda de operación con recursos dentro de la banda de operación en LTE (Tello O & Castro L, 2022).



Figura 4. Logo de NB- IoT (Reales IoT, 2025).

En la tabla 1 se muestra la Comparación que existe en las tecnologías IoT mencionadas

Tabla 1. Comparación de tecnologías LPWAN.

Protocolo	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Estándar	Compañía SigFox en colaboración con ETSI en la estandarización	LoRa-Alliance	3GPP
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	Banda 915 MHz en USA	Banda 915 MHz en USA	Frecuencia licenciada de LTE
Ancho de banda	100 Hz	250 KHz a 125 KHz	200 KHz
Máxima tasa de datos	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidireccional	Limitado / Half-duplex	Si / Half-duplex	Si / Half-dúplex
Máximos mensajes al día	140 (UL), 4 (DL),	Ilimitado	Ilimitado
Máxima longitud de Payload	12 bytes (UL), 8 bytes (DL),	243 bytes	1600 Bytes
Rango de cobertura	10 km (urbano), 40 Km (rural)	5 km (urbano), 20 Km (rural)	1 km (urbano), 10 Km (rural)
Autenticación y encriptación	No soportado	Si (AES128b)	Si (encriptación LTE)
Tasa de datos adaptativa	No	Si	No
Localización	Si (RSSI)	Si (TDOA)	No (bajo especificación)
Permite red privada	No	Si	No

2.3. Tecnología LoRa

Lora (Long Range), es una técnica de demodulación de capa física basada en Chirp Spread Spectrum, patentada por la empresa francesa Semtech, que se puede utilizar en el espectro de radiofrecuencia sin licencia para datos transmisión, incluyendo la banda ISM y la banda U-NII. La propuesta de Lora es habilitar una tecnología de comunicación inalámbrica que cumpla con las premisas de LPWAN a un bajo costo de implementación y posibilitar, a través de un estándar de comunicación llamado LoRaWAN, la interconexión de varios dispositivos separados por una larga distancia sin necesidad de sistemas complejos de transmisores y receptores (Lucas R, Arlindo F, & Lauro P, 2018).

2.3.1. Modulación LoRa

La modulación Lora se produce en la capa física que utiliza modulación patentada Chirp Spread Spectrum (CSS) derivada del esquema de modulación de espectro ensanchado. El concepto de la modulación de espectro ensanchado chirp está transformando un solo bit de información en otra serie del bit y difundirla en el todo el espectro. Además, este tipo de modulación opera por debajo el nivel de ruido que lo hace más resistente a la interferencia del ruido y atasco (Ramos G, 2022), en otras palabras, la señal o información es extendiéndose a través de la banda ancha. La modulación de espectro ensanchado es una antigua técnica de modulación desarrollada en 1940 que fue utilizado originalmente para la comunicación militar.

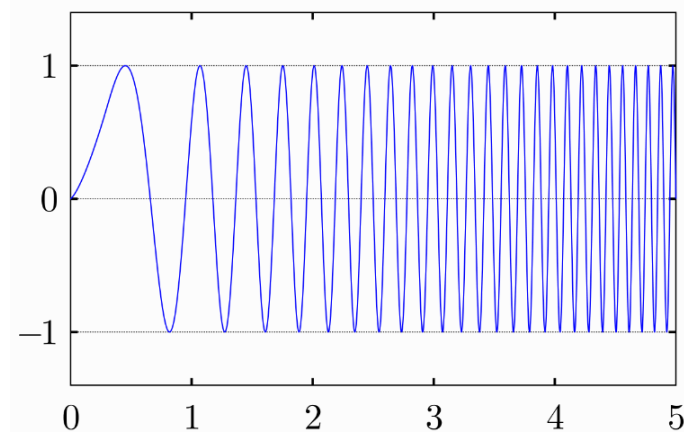


Figura 5. Chirp Spread Spectrum (Wikipedia, 2025)

La palabra "chirrido" significa Pulso de radar de alta intensidad comprimido. Se define que el aumento y disminución de la frecuencia de la señal con tiempo durante el proceso de modulación. Hay cinco importantes parámetros en LoRa física que son la frecuencia portadora, potencia de transmisión, factor de dispersión (SF), ancho de banda (BW) y código tasa (CR).

Como se mencionó anteriormente, hay tres frecuencias portadoras principales; 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz a las que opera la tecnología LoRa.

2.3.2. Bandas de frecuencias LoRa

LoRa utiliza frecuencias sin licencia dentro de la banda ISM (Industrial, Científica y Médica). En Europa se usa 868Mhz, en EU 915Mhz y en Asia 433Mhz. Aunque, esto varía dependiendo del país o región donde nos encontremos (González B, 2024). En la tabla 2. se muestran las frecuencias existentes y su región correspondiente.

Tabla 2. Lista de frecuencias LoRa

REGION	RANGOS DE FRECUENCIAS
Europa	(863-879) MHz 433MHz
USA	902-928 MHz
China	(470-510) MHz (779-787) MHz
Australia	915-928 MHz
India	865-867 MHz
Asia	433 MHz
Norte América	915 MHz

Al usar una frecuencia sin licencia, cualquiera puede configurar su red. Hay dos opciones para conectar dispositivos IoT con LoRa:

- Crear una red propia comprando chips LoRa, desarrollando *gateways* y nodos, pero con la responsabilidad de mantenerla.
- Contactar con un operador de red como Orange para obtener un plan de conectividad, de esta manera se evita el mantenimiento, aunque existe la posibilidad de que el servicio sea discontinuo.

2.4. Componentes hardware dentro de una Red LoRa

En una red LoRa el hardware los dispositivos son la base en la cual se construyen las funcionalidades de la red, en donde, cada componente como los microcontroladores y antenas LoRa son cruciales en la eficiencia y alcances de la comunicación. Se debe saber escoger que hardware permite incursionar en varias aplicaciones desde agricultura con precisión hasta gestiones de infraestructuras urbanas.

2.4.1. Microcontroladores en IoT

Los microcontroladores son diseñados con circuitos integrados con el fin de controlar dispositivos electrónicos, además actúan como “cerebro” de sistemas sencillos y con una mayor complejidad como sistemas industriales a gran escala, una de sus funciones principales es de ser capaz de leer datos enviados por sensores y poder actuar en base a estos datos, controlando actuadores para obtener resultados que se deseen (De La Cruz C, 2022).

2.4.1.1. Funcionamiento de un microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que combina un procesador central, memoria y periféricos en un solo chip que mediante el trabajo en conjunto pueden realizar acciones específicas, configuradas en su memoria como se muestra en la figura 6. Este proceso se lo lleva de la siguiente manera:

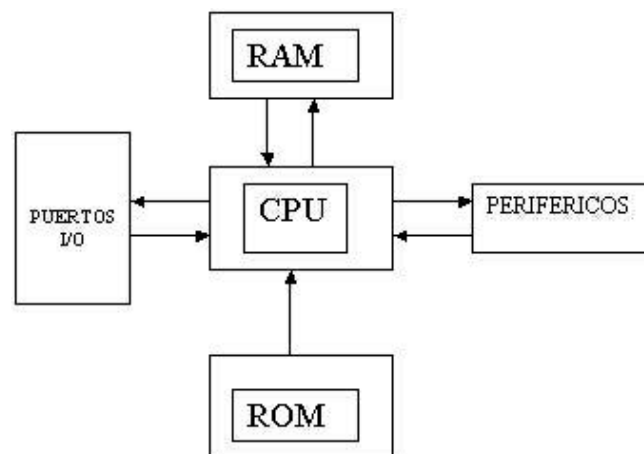


Figura 6. Diagrama de bloques de un microcontrolador (PICmicro, 2020).

- Programación: Contiene una secuencia de instrucciones dentro de la memoria del microcontrolador.
- Lectura de datos: Obtiene los datos de sensores y los envía al procesador.
- Procesamiento: Ejecuta las instrucciones programadas, realizan cálculos y toma decisiones en base a los datos que recibe.
- Escritura de datos: En este caso los actuadores reciben las instrucciones enviadas por el procesador y las ejecuta en tiempo real.

2.4.1.2. Selección de un microcontrolador

La selección del microcontrolador adecuado requiere un análisis cuidadoso de los requerimientos del proyecto y una evaluación detallada de las características técnicas de los diferentes dispositivos disponibles en el mercado. Al tomar una decisión informada, se puede garantizar el éxito del proyecto y asegurar un desempeño óptimo del sistema embebido.

La velocidad de procesamiento es un factor clave, especialmente en aplicaciones que demandan un alto rendimiento, como el procesamiento de señales o el control en tiempo real. La cantidad de memoria disponible, tanto RAM como ROM, determinará la capacidad del microcontrolador para almacenar datos y ejecutar programas. Los periféricos integrados también son fundamentales, ya que permitirán interactuar con sensores, actuadores y otros dispositivos externos, a continuación, en la tabla 3 se detallan las especificaciones de cada familia de microcontroladores (Vásquez P & León M, 2024).

Tabla 3. Comparativa de diferentes familias de microcontroladores

Familia	Fabricante	Arquitectura	Características destacadas	Aplicaciones típicas
PIC	Microchip Technology	RISC	Bajo consumo, fácil programación, amplia gama de periféricos	Electrónica de consumo, control industrial, instrumentación
AVR	Microchip Technology (antes Atmel)	RISC	Alto rendimiento, bajo consumo, periféricos flexibles	Electrónica de consumo, robótica, instrumentación
ARM Cortex-M	ARM	RISC	Alto rendimiento, gran variedad de núcleos, amplia gama de periféricos	Aplicaciones de alta performance, IoT, control industrial, automoción
8051	Intel (entre otros)	CISC	Arquitectura clásica con gran base instalada y de bajo costo	Aplicaciones sencillas y control de motores
MSP430	Texas Instruments	RISC	Muy bajo consumo, ideal para aplicaciones alimentadas por baterías	Sensores inalámbricos, y medidores inteligentes

2.5. Radios LoRa

Se estima que en los próximos años la tecnología LoRa presente un gran avance dentro del campo de las comunicaciones inalámbricas en referencia por su bajo consumo energético, gracias a las características que presenta la hacen una tecnología ideal para aplicaciones IoT. (Bohórquez P & Taco G, 2023).

Ahora, refiriéndonos a los módulos existentes para LoRa, sabemos que existe una amplia gama de dispositivos en el mercado, cada una de ellas cuentan con sus característica y especificaciones propias, entre algunos de los fabricantes más destacados de módulos LoRa están: Microchip, Semtech, SX127x (Tolozza M, 2024).

Los módulos son capaces de integrar componentes electrónicos que implementan comunicaciones LoRa, como son los microcontroladores, amplificadores de potencia y transceptor. Una de las piezas claves para saber elegir que modulo es el más adecuado dependerá de factores como la tasa de datos, consumo energético, alcance máximo y el costo de cada dispositivo.

La arquitectura de una red LoRa se plantea en los siguientes tres componentes fundamentales:

- 1. Nodos finales:** Al hablar de nodos finales nos referimos a dispositivos de menor complejidad y menor consumo energético que puede tener una red. Normalmente están equipados con sensores que recolectan datos del entorno (temperatura, humedad, movimiento, etc.) y se encapsulan en paquetes de datos para su transmisión.
- 2. Pasarelas:** Actúan como puente entre nodos finales y la red troncal. Siendo estos dispositivos ubicados en puntos muy elevados para maximizar la cobertura y señal, reciben los paquetes de datos de los nodos finales y los reenvían a la red troncal.
- 3. Red troncal:** Se encarga de enrutar los datos recibidos de las pasarelas hacia la nube o hacia sistemas de gestión de datos. Una red troncal se puede definir como una red celular o una red IP.

Para que exista comunicación dentro de la red LoRa, el nodo final deberá enviar datos, estos datos utilizan una técnica llamada “chirp”

El proceso de comunicación en una red LoRa se inicia cuando un nodo final tiene datos que enviar. El nodo modula los datos utilizando la técnica chirp spread spectrum (CSS), que se basa en emplear variaciones de frecuencia para que al codificar la información sea de manera más robusta y eficiente.

La señal que se propaga por el medio inalámbrico (aire) es captada por la pasarela más cercana (puede ser un Gateway), la cual actuará como puente entre la red LoRa y la red troncal. Esta pasarela demodula los datos recibidos y verifica la integridad del paquete antes de ser reenviado hacia un servidor de red LoRaWAN, y finalmente continúa su procesamiento hasta que la entrega a la aplicación asignada.

2.5.1. Componentes clave para un módulo LoRa

Cada módulo LoRa contiene todos los elementos electrónicos necesarios para comunicarse dentro de un circuito integrado, estos componentes en conjunto permiten la

transmisión y la recepción de datos de forma estable y eficiente, a continuación, se describirá elementos claves para un módulo LoRa:

- **Transceptor LoRa:** Se lo conoce como el corazón del módulo, encargado de las funciones de radiofrecuencia (modulación y demodulación de la señal).
- **Microcontrolador:** Se encarga de controlar y gestionar el funcionamiento del transceptor, además de configurar la red, procesar los datos que se reciben y envía comandos al transceptor.
- **Oscilador:** Para que exista la modulación y demodulación de la señal, el oscilador proporciona la señal de frecuencia referente necesaria.
- **Filtro:** Se los utiliza para eliminar ruidos e interferencias que afectan la señal dentro de la red.
- **Amplificador de potencia:** Aumenta la potencia de la señal de salida en caso sea necesario.
- **Antena:** A pesar que no siempre viene integrado a los módulos, son necesarios para la comunicación inalámbrica.

2.6. Placas de desarrollo con módulo LoRa

Las placas de desarrollo que vienen incluido los módulos LoRa son herramientas indispensables para IoT, ofrecen la facilidad de crear prototipos de manera rápida e incluso para el desarrollo de aplicaciones que necesiten una comunicación inalámbrica de corto y largo alcance con un bajo consumo energético, además cuentan con una versatilidad y flexibilidad en sus placas de desarrollo, que impulsan la creación de una alta gama de dispositivos IoT, gracias a su interfaz sencilla, la comunidad de desarrolladores alrededor de LoRa es muy activa, lo que facilita encontrar soporte, tutoriales y ejemplos de código para cada aplicación (Santana P, 2023).

Ejemplos de las aplicaciones más comunes:

- **Agricultura con precisión:** Monitoreo de temperatura, la humedad del suelo y otros parámetros ambientales dentro de áreas grandes de trabajo.
- **Smart Cities (Ciudades Inteligentes):** Gestión de la iluminación pública, recolección de residuos y monitoreo de la calidad del aire, para zonas urbanas con avances tecnológicos.
- **Industria:** Monitorización de equipos con mantenimientos predictivos cada cierto tiempo.

- **Logística:** Seguimiento de activos y gestión de inventarios.
Ejemplos de las placas más comunes:
- **Arduino MKR WAN 1300:** Desarrollada por Arduino que combina la facilidad de uso de la plataforma Arduino con la conectividad LoRa, contiene un microcontrolador SAMD21 y un módulo LoRa SX1276, el cual se convierte en una de las opciones populares para proyectos de IoT de nivel básico e intermedio.
- **Dragino LoRaWAN Gateway:** Aunque se utiliza primordialmente como una Gateway (puerta de enlace) para redes LoRaWAN, también cumple como una placa de desarrollo.
- **Heltec LoRa 32:** Combina un módulo LoRa SX1278 con un microcontrolador ESP32, siendo ampliamente utilizada en proyectos que requieren de alto rendimiento.
- **RAKwireless WisBlock:** Permite a los desarrolladores crear soluciones LoRa personalizadas combinando diferentes módulos.

2.6.1. Heltec LoRa 32

Dentro del ecosistema LoRa las placas de desarrollo Heltec LoRa 32 se consolidan como una de las placas más versátiles dentro del mercado LoRa por integrar un microcontrolador ESP32 que mantiene un alto rendimiento y bajo consumo energético, combina características especiales, facilidad de uso e instalación y mantiene una comunidad activa que permiten que sea una opción eficaz para variedad de proyectos de alta gama en IoT (Giménez C, 2023).

Una de las principales ventajas de la Heltec LoRa 32 es su amplia variedad de interfaces. La placa incluye pines GPIO, interfaces I2C, SPI y UART, lo que facilita la conexión de sensores, actuadores y otros dispositivos externos.

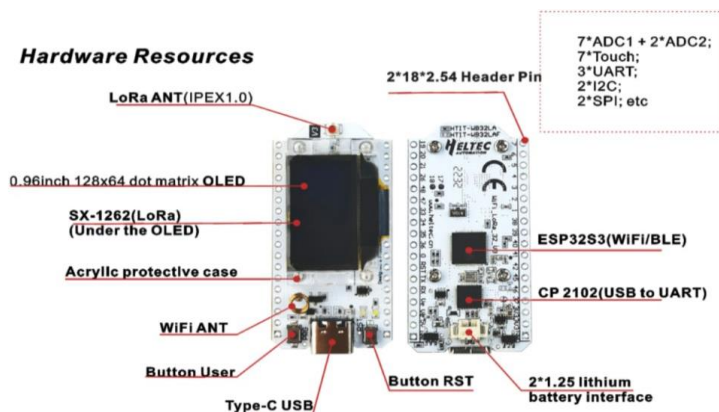


Figura 7. Hardware Heltec LoRa 32 (AliExpress, 2025)

2.7. Interfaz microcontrolador-radio

La interfaz entre microcontrolador y módulo LoRa, se establece a múltiples niveles. A nivel físico, señales digitales se transforman en ondas electromagnéticas mediante transmisores y receptores, mientras que antenas permiten su propagación. La capa de enlace de datos estructura los mensajes en campos específicos como preámbulo, cabecera, payload y CRC, asegurando la sincronización y detección de errores. La interfaz de programación, generalmente una librería, facilita la interacción del desarrollador con el módulo, permitiendo configurar parámetros, enviar y recibir datos, y gestionar eventos. La elección de la tasa de bits, potencia de transmisión, modulación y spread spectrum impacta directamente en el rendimiento y alcance de la comunicación LoRa (Orrala R, 2023).

Dejando a un lado la capa física, surge un componente clave para desarrollar actividades que se enfoquen en la implementación de soluciones IoT más no en el diseño del hardware: API (Interfaz de Programación de Aplicaciones), esta interfaz permite que los desarrolladores interactúen con la tecnología LoRa por medio del microcontrolador, API se presenta como la librería que abstrae detalles técnicos y proporciona herramientas para que interactúe con el módulo ofreciendo las siguientes funcionalidades:

- **Configuración del módulo:** Establecer los parámetros clave como la frecuencia en la que se desea trabajar, la potencia de transmisión y tasa de datos.
- **Envío y recepción de paquetes:** Crea y envía datos por paquetes, además de procesar la información entrante.
- **Gestión de interrupciones:** Configurado para interrupciones en eventos de recepción de paquetes o al final de las transmisiones.
- **Manejo de errores:** Detecta y maneja errores de comunicación LoRa.

2.7.1. Librerías LoRa

En LoRa las librerías tienen un peso fundamental para desarrollar aplicaciones dentro de esta tecnología inalámbrica, herramientas como software que permiten encapsular e interactuar con el hardware proporcionando el desarrollo de una interfaz más sencilla para el control de los módulos lora.

2.7.1.1. Tipos de librerías

- **Librerías específicas de la plataforma**

Desarrolladas por los fabricantes de placas de desarrollo, estas librerías están optimizadas para el hardware específico y suelen ser la opción más sencilla para empezar.

- **Librerías de terceros**

Ofrecen una mayor flexibilidad y pueden ser personalizadas para necesidades específicas. Algunas de las librerías de terceros más populares incluyen SX127x, Semtech LoRaWAN, etc.

2.8. Protocolos de comunicación

Los protocolos de comunicación se desempeñan como un papel fundamental tras el éxito de esta tecnología inalámbrica, se definen reglas y convenciones que rigen el intercambio de información entre los dispositivos que conforman una red LoRa, permitiendo la construcción de redes de áreas amplias con un bajo consumo energético.

Estos protocolos cuentan con una estructura dividida en capas, que facilitan la gestión de la red y la interoperabilidad de dispositivos y empresas fabricantes, la capa física es la encargada de la transmisión y recepción de las señales de radio, la capa de enlace de datos se encarga de la gestión de acceso al medio y estructura los paquetes. La capa de red y de aplicación vienen a ser capas superiores que proporcionan servicios extras como enrutar paquetes.

2.8.1. Protocolo LoRaWAN

El protocolo LoRaWAN se consolida como un factor estándar para las redes de área amplia de bajo consumo, su estructura está basada en redes de internet, es decir, cuenta con arquitectura en capas, facilitando la gestión y el mantenimiento de la red. (Velásquez V, 2023).

Cuenta con la capa física que se encarga de modular, codificar y la transmitir señales radio, además utiliza la modulación chirp spread spectrum (CSS), técnica que le confiere una alta inmunidad al ruido y permite alcanzar grandes distancias de comunicación. La capa de enlace de datos (MAC) en LoRaWAN coordina la comunicación entre los dispositivos en una red LoRa, adicionalmente define las reglas y procedimientos que gobiernan el acceso al medio, estructura de paquetes y el control de errores.

2.8.1.1. Mecanismos clave en la capa MAC

- **Acceso Aleatorio con Retroceso Exponencial:** Permite que múltiples dispositivos compartan el mismo canal de comunicación sin una coordinación centralizada, en donde, cada dispositivo espera un tiempo aleatorio o determinado antes de volver a

transmitir. Si llega a existir una colisión, el tiempo de espera se duplica exponencialmente hasta que la transmisión se realiza con éxito, asegurando un uso eficiente del espectro radioeléctrico evitando congestiones dentro de la red.

- **Escucha Antes de Transmitir (LBT):** Para una buena comunicación y evitar probabilidades de interferencias, un dispositivo debe escuchar el canal y poder detectar si existe otra presencia de otras transmisiones, si el canal se encuentra ocupado, pospone la transmisión y así evita colisiones.
- **Estructura de los paquetes:** LoRaWAN contiene una estructura sólida y definida que incluyen campos para dirección, payload (datos), CRC (checksum para detección de errores) y otros datos de control.
- **Confirmación de paquetes:** Garantiza la fiabilidad de la comunicación posibilitando la confirmación de paquetes. En este caso el receptor envía un aviso de recibo al emisor para confirmar que el paquete ha sido recibido correctamente sin errores. Por este motivo en las aplicaciones se pueden implementar mecanismos de retransmisión en caso de errores.



Figura 8. Capas de protocolo LoRa (Venco, 2022)

2.8.2. Protocolo MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo que nace como una solución para la comunicación de máquina a máquina (M2M) e IoT. Se trata de un protocolo de publicación/suscripción, siendo ligero y optimizado para redes con un ancho de banda reducido, de alta latencia y conectividad intermitente.

Lo que lo diferencia de otros protocolos que se basan en solicitudes y respuesta, MQTT dispone de libertad para que los dispositivos puedan publicar mensajes en cualquier tema, y que otros dispositivos puedan suscribirse a estos temas y reciban mensajes relevantes. Este

modelo desacopla a los productores y consumidores de datos, permitiendo que los dispositivos se puedan conectar y desconectar de la red de forma más dinámica. Además, MQTT es extremadamente flexible y fácilmente puede adaptarse a una amplia variedad de topologías de red, desde redes simples punto a punto hasta redes complejas con múltiples brokers. MQTT es altamente escalable, lo que permite conectar un gran número de dispositivos a una misma red (Monges, Flecha, & Chaparro, 2023).

La combinación de MQTT y LoRa da la sensación de algo muy bueno, ya que Ambas tecnologías, por separado, ofrecen ventajas significativas, pero es cuando se unen que su potencial se maximiza. Cuando se integra MQTT en dispositivos LoRa, se crea una combinación poderosa. LoRa se encarga de la comunicación inalámbrica de largo alcance, mientras que MQTT gestiona la entrega de mensajes entre los dispositivos y los servidores. Esta combinación permite construir redes de sensores y actuadores distribuidos de forma amplia y eficiente.

2.8.2.1. Beneficios de usar MQTT en módulos LoRa:

- **Desacople:** Permite que los dispositivos que producen datos y los consumidores operen de manera independiente, facilitando la escalabilidad y flexibilidad de la red.
- **Bajo consumo de energía:** Tanto LoRa como MQTT se encuentran optimizados para minimizar el consumo de energía, lo que ayuda a prolongar la vida útil de las baterías en dispositivos finales IoT.
- **Flexibilidad:** Admite diferentes niveles de calidad de servicio (QoS), adaptando la comunicación a las necesidades específicas de cada aplicación.
- **Simplicidad:** La implementación de MQTT en dispositivos LoRa es relativamente sencilla, gracias a la disponibilidad de librerías y herramientas de desarrollo que se encuentran en comunidades relacionadas a esta tecnología inalámbrica.

Para conectar módulos LoRa al protocolo MQTT se requiere conocer lo siguiente:

- 1. Dispositivos LoRa:** Los dispositivos que estén equipados con un módulo LoRa deben ser capaces de recolectar datos por medio de sensores o actuadores.
- 2. Pasarela LoRa:** Los datos recolectados pasan por una pasarela, la cual, actúa como puente entre la red LoRa y la red IP.
- 3. Broker MQTT:** Traduce los datos que se reciben en formato MQTT y los publica en un tema específico dentro de un broker MQTT.

- 4. Suscriptores MQTT:** Servicios y aplicaciones que tengan interés en esos datos se suscriben a los temas correspondientes para recibir los mensajes que se publiquen.

2.8.3. Comparativa LoRaWAN y MQTT

LoRaWAN y MQTT son dos de los protocolos más fundamentales en el ámbito IoT, cada uno cuenta con un rol específico entre la comunicación de los dispositivos. LoRaWAN se encarga de la capa física y de enlace de datos, proporcionando una conexión de largo alcance y bajo consumo energético en redes de área amplia. Por su parte, MQTT opera a nivel de aplicación, facilitando la comunicación entre dispositivos y aplicaciones a través de un modelo de publicación-suscripción, en la tabla 4 se analizan las características de cada protocolo.

Tabla 4. Comparativa: LoRaWAN vs. MQTT

Característica	LoRaWAN	MQTT
Capa	Física y enlace de datos	Aplicación
Alcance	Largo alcance (varios kilómetros)	Corto alcance (dentro de una red local)
Tasa de datos	Baja (ideal para datos esporádicos)	Variable (desde baja a alta)
Topología	Estrella (dispositivos a una puerta de enlace)	Publicador-suscriptor (muchos a muchos)
Eficiencia energética	Alta (ideal para dispositivos con batería)	Alta (ligero y eficiente)
Latencia	Alta (tiempo de respuesta puede ser elevado)	Baja (tiempo de respuesta rápido)
Seguridad	Fuerte enfoque en seguridad y en la encriptación de datos	Seguridad configurable, dependiendo de la implementación
QoS	Múltiples niveles de QoS que garantiza las entregas de mensajes o paquetes	

2.9. Parámetros de configuración y su impacto en el rendimiento

Los parámetros de configuración dentro de una red LoRa son el conjunto de variables y técnicas que determinan cómo se llevará a cabo la transmisión y recepción de datos dentro de la red, cada parámetro incluye valores que afecten de manera directa la forma en que las señales son moduladas, transmitidas y recibidas entre Gateways (puntos de acceso) y nodos (dispositivos), así como la eficiencia energética de los equipos y la cobertura de la red

(Martinez A, 2024). A continuación, los principales parámetros de configuración para una red LoRa.

2.9.1. Spreading Factor

Spreading Factor (SF) o factor de propagación se considera como una pieza fundamental en la tecnología LoRaWAN, debido a que influye prácticamente directo en el rendimiento y eficiencia de redes de baja potencia, pero con un gran alcance.

En la modulación LoRa se utiliza seis factores de expansión, van desde SF7 hasta SF12 que afectan varios aspectos de la transmisión, como la velocidad de los datos, el tiempo en que una señal permanece en el aire, la duración de la batería de cada dispositivo y la sensibilidad que tiene el receptor. En conclusión, si a mayor factor de expansión, mayor será la sensibilidad y cobertura, pero con una menor velocidad de datos, además de mayor consumo de energía (Jaszczyszyn, Guiguet, & Ramón, 2024). Los SF se eligen según el equilibrio necesario entre alcance y eficiencia energética dependiendo de las aplicaciones en que se las quiera utilizar. Esto permite que los dispositivos puedan conectarse a largas distancias, pero con cierto compromiso en el tiempo de transmisión y el consumo energético.

Si se utiliza un Data Rate bajo (es decir, un factor de expansión alto), que generalmente se puede transmitir hasta 11 bytes de datos en cada uplink (puerto de mayor velocidad), en cambio al utilizar un Data Rate alto (con un factor de expansión bajo), es posible transmitir hasta 51 bytes de datos en cada uplink. Esto se debe a la relación que existe entre el factor de expansión y la capacidad de transmisión, donde un factor de expansión bajo permite una mayor tasa de datos y, por tanto, una mayor cantidad de bytes transmitidos. En la tabla 5 se muestra el tiempo de transmisión que se necesita según el Spreading Factor utilizado.

Tabla 5. Tiempo de Transmisión Spreading Factor

	10 bytes (ms)	51 bytes (ms)
<i>SF7</i>	62	118
<i>SF8</i>	113	206
<i>SF9</i>	206	390
<i>SF10</i>	371	697
<i>SF11</i>	823	1561

2.9.2. Potencia de transmisión

La potencia de transmisión influye significativamente en el rendimiento global de la comunicación en redes de largo alcance y bajo consumo, es la fuerza en la que una señal se envía desde un nodo hacia un Gateway y su valor se mide en decibelios milivatio (dBm). Los dispositivos LoRa se pueden permitir ajustar la potencia de transmisión que se desee en un rango que varía desde unos pocos dBm hasta valores altos, todo dependiendo de las capacidades del hardware y las regulaciones locales. Este factor impacta de manera considerable en la cobertura de la red, el uso de energía y el nivel de interferencias que se pueden generar (Jaszczyszyn, Guiguet, & Ramón, 2024).

2.9.3. Impacto en la Cobertura

La potencia de transmisión tiene un impacto directo en la cobertura de la red, siendo uno de sus efectos más importantes. A mayor potencia, la señal puede cubrir mayores distancias y atravesar obstáculos como paredes y árboles con mayor facilidad. Esto resulta útil en entornos rurales e industriales, donde cada dispositivo se ubica lejos de los Gateway, para estos casos, se requiere el aumento de la potencia de transmisión para asegurar que las señales lleguen con suficiente intensidad al Gateway, y así evitando pérdida de datos y mejorando la fiabilidad de la red (Almeida C, 2025).

No obstante, al incrementar la potencia no siempre es la única solución o la más adecuada, debido a que en áreas urbanas densamente pobladas, el espectro de frecuencia está muy ocupado y el riesgo de interferencias es muy elevado, el aumento de potencia puede llegar a generar problemas adicionales. Una transmisión con más potencia puede llevar a provocar interferencias que afecten directamente la calidad de la señal en otros dispositivos que operen dentro de la misma banda de frecuencia, lo que deteriora el rendimiento global de la red.

2.9.4. Consumo Eléctrico

Los dispositivos LoRa generalmente son diseñados para operar con baterías durante largos periodos de tiempo y uso, se deben equilibrar las necesidades de una comunicación efectiva con la eficiencia energética. Como ya se mencionó a una mayor potencia de transmisión implicará un mayor consumo de energía, lo que reduce la duración de la batería. Por tanto, en aplicaciones donde el ahorro de energía es crucial, como en el monitoreo de sensores en ubicaciones remotas, es importante ajustar la potencia de transmisión de manera óptima para minimizar el consumo energético sin comprometer la calidad de la comunicación (Paredes L, 2024).

2.9.5. Regulaciones y Cumplimiento

La potencia de transmisión está regulada por normativas locales que varían según el país y la región, para Ecuador la frecuencia de funcionamiento es de 915 a 928 MHz y 2.4 Ghz según la ARCOTEL. Las regulaciones fueron diseñadas con el fin de evitar la interferencia entre diferentes sistemas de comunicación, garantizando el uso equitativo del espectro. En muchas regiones los dispositivos LoRa están sujetos a restricciones que les limitan la potencia de transmisión a ciertos niveles para el cumplimiento de las regulaciones. Es fundamental tener conocimientos de estas normativas para que los dispositivos LoRa eviten sanciones y garanticen un funcionamiento correcto dentro del marco legal (Martinez A, 2024).

2.9.6. Ancho de banda

El ancho de banda hace referencia al rango de frecuencias en la que un dispositivo emplea para enviar y recibir información, los valores más comunes de ancho de banda son de 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz, cada uno con características específicas que pueden influir directamente en el desempeño de la red y que se deben evaluar con mucho cuidado.

Para la elección del ancho de banda dependerá de las necesidades de la aplicación, en casos donde se requiere alta velocidad de transmisión, como un claro ejemplo en la transmisión de video o datos en tiempo real, un ancho de banda mayor es el más adecuado, mientras que en aplicaciones que no necesiten mayor velocidad, como en los casos de monitoreo de sensores o control remoto de redes IoT, un ancho de banda más reducido puede ser una mejor opción (Zambrano S & Velez Z, 2024).

El consumo de energía en dispositivos LoRa que son alimentados por baterías, los anchos de banda de gran valor suelen ser exigentes, debido a que las transmisiones con mayor velocidad demandan más recurso, por esta razón se debe saber elegir correctamente la banda adecuada para maximizar la duración de baterías, específicamente en aplicaciones IoT en donde suelen ser de costo mayores.

2.9.7. Frecuencia de Transmisión (Duty Cycle)

La frecuencia de transmisión controla el tiempo durante el cual un dispositivo puede enviar datos en un periodo determinado, se mide como un porcentaje del tiempo total, esto indica cuánto tiempo permite la transmisión de datos, un duty cycle del 1% indica que un dispositivo puede transmitir durante 1 segundo por cada 100 segundos. Este parámetro evita la saturación del espectro, permitiendo un uso equilibrado entre varios dispositivos que operen en

bandas no licenciadas, especialmente en redes IoT que se encuentren muy pobladas (Martinez A, 2024).

El control del duty cycle juega un papel importante en la reducción de interferencias, garantiza que las señales puedan coexistir de manera eficiente, además asegura que se cumplan las regulaciones locales, como las impuestas por organismos regulatorios. En resumen los dispositivos deberán operar la mayor parte del tiempo en modo de reposo y solo transmitir cuando sea necesario, de esta manera se reduce el riesgo de interferencia y aumenta la eficiencia de la red.

2.10. Calidad de la señal y cobertura

La calidad de la señal y la cobertura son elementos fundamentales en la eficiencia de las redes LoRa, dado que influyen directamente en el desempeño de las comunicaciones a larga distancia en aplicaciones IoT (Chacón P, 2021) , para comprender cómo optimizar estas redes, es esencial analizar diversos factores como la pérdida de trayectoria, las interferencias, el ruido y las métricas de calidad de señal como RSSI, SNR y BER.

2.10.1. Pérdida de trayectoria

La pérdida de trayectoria se refiere al proceso en el cual la señal se debilita a medida que se aleja del transmisor. En LoRa, los modelos de propagación son esenciales para predecir cuánta señal llegará al receptor, considerando factores como la distancia y el entorno. Modelos como el de espacio libre (aplicable en áreas abiertas) o el log-normal (usado en entornos urbanos o con obstáculos) ayudan a estimar esta pérdida (Chacón P, 2021).

En zonas urbanas las barreras físicas como edificaciones, paredes e incluso la vegetación, son capaces de aumentar la atenuación de la señal y disminuir su alcance, mientras que en áreas rurales donde mayormente se encuentran las industrias, las distancias de mayor distancia si pueden generar perdidas de trayectoria a pesar de no contar con muchos obstáculos físicos, pero las redes LoRa están diseñadas para enfrentar esta problemática, se debe de detallar modelos de propagación clave para optimizar las ubicaciones de nodos y Gateways.

2.10.2. Interferencias

Las interferencias se pueden originar de distintas fuentes, como por ejemplo dispositivos que operan dentro de las mismas bandas de frecuencia no licenciadas (como las bandas de 868 MHz en Europa o 915 MHz en América). Estas interferencias se dividen en co-canal e intercanal (Martinez A, 2024).

- **Interferencias co-canal:** Producidas por varios dispositivos que se encuentren transmitiendo en el mismo canal de frecuencia, compartiendo la misma banda no licenciada.
- **Interferencias intercanal:** Se da cuando se superponen señales de canales adyacentes, de esta manera afecta la calidad dentro de la comunicación de cada canal.

Las bandas ISM (Industrial, Scientific, and Medical) son otros ejemplos de frecuencia no licenciadas, utilizadas por múltiples dispositivos y tecnologías, lo que genera un entorno propenso a interferencias, tales como:

- **Dispositivos IoT:** Al existir otra red IoT cercana operando a la misma banda de frecuencia pueden causar interferencias co-canal, debido a que varios dispositivos están compartiendo el mismo canal y transmiten datos a la misma vez, generando colisiones en los datos.
- **Redes WiFi:** A pesar de que trabajan en frecuencias diferentes, las emisiones de ruido que provocan los equipos Wi-Fi pueden llegar a invadir la banda LoRa.
- **Dispositivos Bluetooth:** Si bien la tecnología de Bluetooth opera en la banda 2.4 GHz, sus emisiones pueden llegar a interferir si la señal se encuentra cerca, aunque no implicaría un riesgo mayor.
- **Equipos industriales:** El uso de maquinarias y equipos electrónicos que llegan a generar campos electromagnéticos fuertes también pueden inducir interferencias electromagnéticas, estas señales no deseadas pueden afectar más que todo la sensibilidad en los receptores LoRa.

LoRa emplea técnicas para mitigar las interferencias como la modulación por espectro ensanchado, que se encarga de dispersar la señal sobre una banda ancha de frecuencias, haciéndola robusta frente a interferencias lo que le permite ser más resistente a las interferencias.

2.10.3. Ruido

Existen diferentes tipos de ruido que generan interferencias afectando la calidad de la señal y de la red, como el ruido térmico que es inherente a todos los sistemas electrónicos, y el ruido electromagnético que proviene de fuentes externas como dispositivos electrónicos cercanos.

El ruido tiene un impacto más directo en la sensibilidad del receptor, que es el encargado de detectar señales al sistema, si en una ocasión existe mucha presencia de ruido, la sensibilidad del receptor disminuirá, reduciendo la cobertura y la calidad de la comunicación inalámbrica (López C, 2022).

Si se establece una buena gestión del ruido ayudará a maximizar el rendimiento de la red, especialmente en aplicaciones donde los dispositivos se encuentran alejado de los Gateways. La tecnología LoRa es conocida por su alta sensibilidad, pero a su vez puede verse afectada si no se gestionan adecuadamente las fuentes de ruido dentro del entorno.

2.10.4. Métricas de calidad de señal

Las métricas de calidad de señal son esenciales para evaluar el rendimiento de una red LoRa, dentro de estas métricas se encuentran el RSSI (Received Signal Strength Indicator), el SNR (Signal-to-Noise Ratio) y el BER (Bit Error Rate) (Chacón P, 2021).

2.10.4.1. RSSI (Received Signal Strength Indicator)

El Indicador de Intensidad de Señal Recibida es una medida relativa que determina si la señal recibida es lo suficientemente fuerte como para establecer una buena conexión inalámbrica desde el transmisor hasta el receptor. El RSSI se mide en dBm y su valor tiende a ser de valores negativos, es decir, cuanto más cerca esté el valor del RSSI a cero, más fuerte será la señal recibida y varía entre -120 dBm (señal muy débil) y -30 dBm (señal muy fuerte) (Chacón P, 2021).

Valores que influyen en el RSSI:

- **Pérdida de trayecto:** La señal se reduce a medida que se propaga desde el transmisor hacia el receptor, esto ocurre por varios factores como la distancias de los equipos y obstáculos físicos.
- **Ganancia de la antena:** Se mide la eficacia de la antena para enviar la energía en direcciones particulares, cuando una antena se denomina con alta ganancia es porque concentra la energía de transmisión y de recepción en un área más especificada, esto mejora el RSSI si se aumenta la potencia de la señal.
- **Pérdida en cables o conectores:** Aunque es una tecnología inalámbrica, también necesita en ciertas ocasiones de cableado el cual suelen tener resistencia e imperfección al conectar antenas a los equipos de radiofrecuencia. Estas pérdidas afectan en la

comunicación, disminuyendo la potencia de la señal, se debe de considerar también la longitud del cableado y la frecuencia en que se opera.

2.10.4.2. SNR (Signal-to-Noise Ratio)

La Relación Señal-Ruido es una medida que se encarga de comparar el nivel de la señal útil recibida con el nivel del ruido no deseado, sus valores se expresan en decibelios (dB) y es uno de los indicadores clave para determinar la calidad de la señal en sistemas de las comunicaciones inalámbricas (González P, Tobón V, & Sepúlveda C, 2024).

El SNR se calcula como la relación entre la potencia de la señal (P_{signal}) y la potencia del ruido (P_{noise}), como lo muestra la ecuación 1:

Ecuación 1. Relación Señal-Ruido

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

En redes LoRa, se espera que el SNR se mantenga con valores entre -20 dB y +10 dB, por lo que valores inferiores de -10 dB suelen ser un problema para la recepción de datos.

Si se tiene un SNR alto, nos indica que la señal recibida es mucho más fuerte que el ruido de fondo, permitiendo una comunicación clara y estable, y si obtenemos un SNR bajo o negativo, el ruido suele ser superior a la señal, lo que dificulta la decodificación de la información.

2.10.4.3. BER (Bit Error Rate)

El BER (Bit Error Rate) o Tasa de Error de Bits es una métrica fundamental en las comunicaciones digitales, que mide el porcentaje de bits transmitidos que se reciben incorrectamente debido a errores durante la transmisión (González P, Tobón V, & Sepúlveda C, 2024), se define como la razón entre el número de bits erróneos con el número total de bits transmitidos en un determinado período de tiempo como lo muestra la ecuación 2:

Ecuación 2. Tasa de Error de Bits

$$BER = \frac{\text{Número de bits erróneos}}{\text{Número total de bits transmitidos}}$$

El BER en redes LoRa puede variar según las condiciones del enlace y la configuración de los parámetros. Valores de BER excelentes van de 10^{-5} a 10^{-7} , donde solo hay 1 error cada 100,000 o 10 millones de bits, típicos en condiciones óptimas. Un BER aceptable está entre 10^{-3} y 10^{-5} (1 error cada 1,000 a 100,000 bits), que suele ser suficiente para la mayoría de las

aplicaciones IoT. En BER moderado, entre 10^{-2} y 10^{-3} , hay 1 error cada 100 a 1,000 bits, indicando problemas de calidad de señal, y un BER inaceptable es mayor a 10^{-2} , lo que refleja una pérdida significativa de datos, requiriendo ajustes urgentes en la red.

El BER se suele medir en entornos de prueba en donde se utiliza un analizador de señales o simuladores de canal en la que se pueda inyectar ruido u otros efectos dentro del sistema de transmisión, se podrá observar cómo varía la tasa de errores bajo diferentes tipos de condiciones. Estas pruebas permiten a los ingenieros e interesados a evaluar o ajustar los sistemas de comunicación con el fin de mejorar la calidad de la transmisión.

2.11. Consumo energético y optimización de la batería

Este factor se denomina crucial dentro de las redes, debido a que la mayoría de dispositivos finales IoT necesitan de baterías con una larga duración, la transmisión, recepción y el procesamiento de datos son las actividades que más consumen la energía de las baterías. Además, si la distancia entre los nodos y el Gateway son mayores, va a requerir de mayor potencia, esto implica un mayor consumo dentro de la red (Arreaga B & Larreátegui U, 2024).

En LoRa se emplean sensores que son diseñadas para minimizar las interferencias y de maximizar el alcance de la señal a un bajo consumo energético, esto permite que se transmita señales débiles con valores de hasta -120 dBm, aunque la velocidad de transferencia sería baja, no implicaría un inconveniente para la mayoría de aplicaciones.

2.11.1. Técnicas de ahorro de energía

Modos de Bajo Consumo: Una de las estrategias clave es activar modos de bajo consumo, como es el modo de suspensión. En este estado, el dispositivo apaga la mayoría de sus funciones y solo se activa cuando necesita transmitir o recibir datos. Esta técnica extiende significativamente la vida útil de la batería (Arreaga B & Larreátegui U, 2024).

Optimización del Protocolo: Ajustar parámetros como el Spreading Factor (SF) permite equilibrar el consumo energético. Un SF más alto aumenta el alcance de la transmisión, pero con un mayor tiempo de aire, lo que puede reducir el consumo al permitir menos transmisiones a menor potencia. Además, la reducción de la frecuencia de transmisión también ayuda a disminuir el uso de energía.

2.11.2. Modelos de consumo y predicción de vida de la batería

Los modelos de consumo energético se emplean para prever la duración de una batería según el ciclo de actividad del dispositivo, se toman en cuenta el tiempo que el dispositivo pasa

transmitiendo, recibiendo y en caso que se mantenga en modo de bajo consumo (Arreaga B & Larreátegui U, 2024), al calcular el consumo en cada uno de estos estados se logra con precisión saber la vida útil de la batería, algo crucial en aplicaciones de largo plazo, como por ejemplo, sistemas de monitoreo ambiental o seguridad.

2.12. Análisis de datos y optimización de la red

El desempeño que mantienen a las redes LoRa como una de las tecnologías inalámbricas más importantes para aplicaciones de largas distancias con IoT y bajo consumo energético, se debe a diversos factores ya mencionados anteriormente, como las configuraciones de los parámetros y las condiciones del entorno en que se desarrolle, además de los ajustes de ciertos parámetros como la potencia en que se trasmite, ancho de banda y Spreading Factor (sf) (Arreaga B & Larreátegui U, 2024).

El análisis de los datos por medio de herramientas de software que desarrollen entornos de pruebas simulados, es una parte fundamental para la medición de indicadores de rendimiento, como la latencia, consumo energético, pérdida de paquetes, RSSI y SNR, con estos resultados se logra optimizar la red, teniendo como objetivo lograr un equilibrio entre cobertura y eficiencia energética.

2.12.1. Optimización de Parámetros

Las optimizaciones de parámetros son cruciales para la mejora del rendimiento dentro de una red, esto se logra ajustando los parámetros como el Spreading Factor (SF), la potencia de transmisión (Tx Power) y el ancho de banda (Bandwidth), en donde cada uno afecta directamente a la cobertura, la fiabilidad de la transmisión, el consumo de energía y la capacidad de la red para manejar interferencias y el tráfico de datos (Angulo C & Rivera M, 2023).

2.12.1.1. Simuladores para la Optimización

- **OMNeT++:** Es una herramienta que permite modelar y simular el comportamiento de redes, conocido por ser versátil y contar con modelos predefinidos de dispositivos y protocolos, lo que facilita la simulación de topologías de redes más complejas, siendo útil para planificar, modelar y evaluar redes.
- **FLoRa (Framework for LoRa):** A pesar de ser una extensión de OMNeT++ nos brinda la facilidad de simular y crear redes LoRaWAN, proporcionando modelos más precisos para evaluar de manera mas efectiva el rendimiento en

redes LPWAN. Otra característica es que simula las comunicaciones entre nodos y Gateways, así como analizar los parámetros de configuración.

- **NS-3:** Es un simulador de red de código abierto, ampliamente utilizado en investigaciones para modelar redes de telecomunicaciones y sistemas distribuidos. Es ideal para simular redes inalámbricas, IP, redes móviles, satelitales y más, con un enfoque en protocolos de internet. Es flexible y extensible, permitiendo a los usuarios crear módulos personalizados para escenarios de simulación complejos.

2.12.2. Monitoreo de Redes en Tiempo Real

2.12.2.1. The Things Network (TTN)

Es una plataforma de red abierta y comunitaria dedicada a la implementación y gestión de redes LoRaWAN a nivel global. Su objetivo es proporcionar una red de área amplia y de bajo consumo para el Internet de las Cosas (IoT), facilitando la conectividad de dispositivos en áreas urbanas y rurales (Zennaro, Pelsser, Albinet, & Manzoni, 2020).



Figura 9. Logo The Things Network (Wifx, 2021)

Principales características:

- **Red Abierta y Global:** TTN es una red comunitaria que permite a los usuarios contribuir y acceder a la infraestructura de red sin restricciones, facilitando la expansión y el acceso global a soluciones IoT.
- **Tecnología LoRaWAN:** Utiliza la tecnología LoRaWAN, que es conocida por su capacidad para ofrecer comunicaciones de largo alcance y bajo consumo de energía, ideal para aplicaciones IoT que requieren conectividad a larga distancia.
- **Colaboración Comunitaria:** Los usuarios tienen la posibilidad de contribuir con el despliegue de la red, es decir crear puertas de enlaces para el crecimiento de la red y obtener beneficios de la infraestructura existente.

- **Aplicaciones Diversas:** Gracias a The Things Network soporta una gran cantidad de aplicaciones IoT, que van desde monitoreos de condiciones ambientales hasta el control en sectores agrícolas industriales y urbanos.
- **Acceso Libre y Gratuito:** Permite a los desarrolladores el acceso libre para crear experimentos con la tecnología LoRaWAN sin ningún costo.

2.12.2.2. Eclipse Mosquitto

Es un broker MQTT de código abierto, implementado en C, diseñado para facilitar la comunicación entre dispositivos a través del protocolo MQTT. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de mensajería ligero, ideal para la comunicación en redes de bajo ancho de banda y dispositivos con recursos limitados, como los que se encuentran en aplicaciones de IoT (Miró, 2025).



Figura 10. Logo Mosquitto (Beaton, 2021)

Principales características:

- **Ligero y Eficiente:** Diseñado para funcionar con recursos mínimos, tanto en términos de memoria como de procesamiento.
- **Seguridad:** Ofrece opciones para la autenticación y la autorización, así como soporte para TLS/SSL para cifrar las comunicaciones.
- **Persistencia:** Permite la persistencia de mensajes y suscripciones para garantizar la entrega de mensajes incluso en caso de desconexiones.

CAPÍTULO III

3. Definición del entorno de pruebas

3.1. Objetivo del entorno de pruebas

En este proyecto se ejecuta un entorno de pruebas para analizar el comportamiento de una red LPWAN implementada con tecnología Lora, haciendo uso de distintos escenarios y optimizando parámetros que influyan en ella, con la finalidad de evaluar su funcionamiento aplicada al monitoreo en condiciones ambientales y seguridad, para eso se debe de tener en cuenta los siguientes objetivos:

- Realizar un análisis de los parámetros seleccionados que intervienen en el comportamiento de la red como la pérdida de paquetes, la latencia, etc.
- Plantear soluciones que permitan optimizar la red, en cuanto a alcance, consumo de energía y entrega de paquetes confidenciales
- Aplicar estrategias para reducir los factores externos como la interferencia y el ruido presentes en el entorno de pruebas.

3.1.1. Hardware y software utilizados

En esta sección se detallan los componentes de hardware y software usados en este proyecto.

3.1.1.1. Heltec-T-M02 Edge LoRa Gateway (V2)

Se trata de un Gateway de última generación para redes LPWAN que usa LoRaWAN, perfecto para el Internet de las Cosas en zonas extensas con poco gasto de energía. Esta versión (V2) como se muestra en la figura 11, viene mejorada en rendimiento y funciones respecto a versiones anteriores, haciendo que sea una alternativa sólida y adaptable para pruebas y uso industrial (Heltec, 2025).



Figura 11. Heltec-T-M02 Edge LoRa Gateway (V2) (AliExpress V. , 2024)

Características principales:

- Este dispositivo funciona con el protocolo LoRaWAN lo que permite vincularse con la plataforma en la nube TTN además permite configurar los equipos de manera remota como sistemas de vigilancia.
- Ayuda a mantener una comunicación estable en escenarios poco favorables porque cuenta con aceptación de sensibilidad alta, es decir recepta señales de -139 dBm
- Cuenta con autenticación por lo que los datos enviados serán receptados de buena manera.

En la tabla 6 se detalla las especificaciones técnicas de este componente

Tabla 6. Especificaciones Heltec-T-M02 Edge LoRa Gateway (V2)

HARDWARE	RECURSOS
UPC	Procesador ROCKCHIP de cuatro núcleos Cortex-A55 de 64 bits a 1,8 GHz.
RAM	2 GB DDR4
Memoria de sólo lectura	32G eMMC 5.1 (disponible para personalizar a 8/16/64/128G)
Potencia de transmisión LoRa	Hasta 26 ± 1 dBm
Sensibilidad de recepción de LoRa	-125 dBm a 125 KHz/SF7 -139 dBm a 125 KHz/SF12
Sistema operativo	Entrada de CC, encabezado de depuración UART, interfaz ETH, ranura para tarjeta SIM, conector de antena SMA*3 (LoRa, 4G, Wi-Fi 2,4 GHz)
Ethernet (predeterminado)	100/1000M.
LTE (Opcional)	Cat. 1 / Cat. 4.
Wi-Fi (Opcional)	IEEE 802.11 b/g/n
PoE (Opcional)	IEEE802.3af
Temperatura Operacional	$-40 \sim 85$ °C

3.1.1.2. Lilygo LoRa32 V2.1_1.6

Es una placa para desarrollo que junta un microcontrolador ESP32 con un módulo LoRa, pensada para proyectos y tareas de IoT donde es clave tener conexión a distancia y gastar poca energía (Gómez L, 2025) , en la figura 12 se puede observar como una antena LoRa está conectada a la placa para transmitir datos a la red.



Figura 12. Lilygo LoRa32 V2.1_1.6 (Lilygo, 2024)

Características principales:

- Tiene un procesador de doble núcleo Tensilica LX6, que deja hacer varias cosas a la vez y procesar datos en tiempo real.
- Incluye conexión WiFi 802.11 b/g/n y Bluetooth BLE 4.2.
- Permite usar LoRa en la banda ISM, compatible con las frecuencias más usadas para LoRa (433 MHz, 868 MHz, 915 MHz).
- La modulación LoRa permite cambiar ajustes como el Spreading Factor y el ancho de banda.
- Pines de entrada y salida digital, ADC, DAC, y PWM, con lo que se pueden conectar muchos sensores y actuadores.

3.1.1.3. Heltec WiFi LoRa 32 (V3)

Este módulo integra una unidad de procesamiento ESP32, un transceptor LoRa SX1262, conectividad WiFi, Bluetooth, y una pantalla OLED de 0.96". Esta placa es ampliamente utilizada en aplicaciones IoT por su bajo consumo energético, capacidad de comunicación de largo alcance y facilidad de integración con plataformas como The Things Network (TTN) (Fernandez P & Robayo T, 2022).

Como se ilustra en la Figura 13, se muestra la distribución de pines, los componentes principales del módulo y la antena LoRa, lo cual facilita su incorporación en entornos de monitoreo y pruebas experimentales.



Figura 13. Heltec WiFi LoRa 32 (V3) (Lilygo, 2025)

Características principales:

- El dispositivo cuenta con un microcontrolador ESP32 a diferencia de otras versiones este fue diseñado para reducir el consumo de energía.
- Para mejorar la sensibilidad al recibir las señales este dispositivo integra un chip SX1262, lo que hace el equipo que tenga un buen rendimiento.
- Alcanza distancias de hasta 15 km porque cuenta con un SX1262, es una de las versiones mejoradas de chips LoRa.

3.1.1.4. Comparación entre Lilygo V2.1_1.6 y WiFi LoRa 32 (V3)

Se muestra una comparativa de las características de los dispositivos Lilygo V2.1_1.6 y WiFi LoRa 32 (V3) en la Tabla 7 se detalla la información.

Tabla 7. Comparación entre Lilygo 32 V2.1_1.6 y WiFi LoRa 32 (V3)

CARACTERÍSTICAS	Lilygo 32 V2.1_1.6	WiFi LoRa 32 (V3)
Chip LoRa	SX1276	SX1262
Microcontrolador	ESP32 (dual-core)	ESP32 (dual-core, optimizado)
Pantalla OLED	0.96 pulgadas	0.96 pulgadas
Modos de Energía	Básicos de ESP32	Optimizados, con soporte para baterías y solar
Aplicación Principal	Prototipos de IoT u monitoreo remoto	Sistemas IoT autónomos y ciudades inteligentes
Rango de Cobertura	Hasta 10KM	Hasta 15KM
Conectividades	WiFi, Bluetooth	WiFi, Bluetooth
Alimentación para Baterías	Sin puerto de batería dedicado	Puerto para batería y protección solar
Consumo Energético	Eficiencia estándar	Mejorado para menor consumo en modo de espera

3.1.1.5. The Things Network (TTN)

The Things Network (TTN) es una infraestructura de red pública y colaborativa que permite el despliegue de redes IoT utilizando el protocolo LoRaWAN. Su principal objetivo es

proporcionar una plataforma de acceso gratuito que permita a desarrolladores, empresas, y entusiastas de IoT conectar y gestionar dispositivos a través de largas distancias, con un bajo consumo de energía y de forma segura (Zennaro, Pelsser, Albinet, & Manzoni, 2020).



Figura 14. The Things Network (TTN) (LoRa Alliance, 2024)

Características principales:

- Utiliza el protocolo LoRaWAN, que permite la comunicación de largo alcance y bajo consumo energético ideal para aplicaciones IoT
- Permite la conexión de diferentes tipos de sensores y dispositivos en una misma red, facilitando la integración de múltiples aplicaciones en un solo ecosistema.
- Utiliza métodos de encriptación a nivel de red y de aplicación, garantizando que solo los usuarios autorizados puedan acceder a los datos.

3.1.1.6. OPNET LoRa

OPNET LoRa es una herramienta de simulación que es creada para el estudio del comportamiento de redes como LoRa y LoRaWAN, tiene como objetivo principal brindar un entorno virtual en el que los usuarios tengan la facilidad de configurar y evaluar el comportamiento de las redes antes de su implementación física (León M & Sánchez C, 2020).

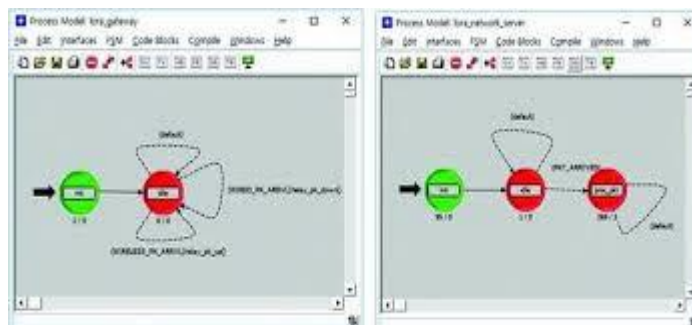


Figura 15. OPNET LoRa (Jun, y otros, 2017)

Características principales:

- Permite modelar redes de sensores que operan con el protocolo LoRa. Los usuarios pueden ajustar parámetros de configuración específicos como el Spreading Factor, la potencia de transmisión y el ancho de banda.
- Facilita la simulación de escenarios reales en los que los dispositivos se comunican a través de largas distancias y bajo restricciones de consumo energético.
- Permite evaluar cómo las interferencias y las barreras físicas afectan la calidad de la señal, lo cual es crucial para redes IoT que operan en entornos urbanos y rurales.

3.1.1.7. UBIDOTS

Ubidots es una plataforma en la nube diseñada para Internet de las cosas (IoT) que facilita la creación y el control de las aplicaciones de IoT que cubren la recopilación de datos a la visualización y el análisis de tiempo real que simplifica la implementación de soluciones IoT es una herramienta intuitiva que permite a los usuarios que se conectan a los dispositivos, recopilan datos, visualizan la información a través de paneles (Espinosa A & Orellana G, 2021).



Figura 16. UBIDOTS (Capterra, 2022)

Características principales

- Ubidots cuenta con la función de envío de información desde los equipos conectados a una plataforma ya sea de almacenamiento o gestión de datos en la nube, de esta manera va a facilitar el análisis de datos.
- Esta plataforma incluye interfaces visuales como gráficos y widgets interactivos, donde se dan a conocer en tiempo actual los datos que se están monitoreando.
- También cuenta con asignar condiciones por ejemplo configurar para que se activen alarmas cuando los datos se encuentren fuera del rango establecido.

3.1.2. Criterios de evaluación

Se toma en cuenta cada uno de los siguientes parámetros para ejecutar las pruebas y verificar el funcionamiento de la red.

Cobertura y alcance: Estos términos permiten evaluar la conectividad de los dispositivos, siendo la cobertura el área total en donde los equipos interactúan con el gateway y por otro lado el alcance es la distancia mayor en la que se establece una buena comunicación.

- **RSSI (Received Signal Strength Indicator):** Este parámetro indica la fuerza con la que es receptada la señal, es decir si se obtiene un mayor RSSI se obtendrá una buena transmisión.
- **SNR (Signal-to-Noise Ratio):** Este indicador da a conocer la relación que existe entre la señal deseada y la no deseada mayormente conocida como ruido, si se obtiene un buen SNR quiere decir que la red va a distinguir la señal a pesar de que se existan interferencias en el medio.

Consumo energético: Este parámetro indica la energía que consume un equipo en el proceso de transmitir datos, es común tratar de este término en redes IoT donde se emplea con frecuencia nodos que utilizan baterías.

- **Latencia:** Indica el tiempo que tarda el trayecto de envío de paquete desde el nodo hasta el gateway y recibir una respuesta, si se tiene una latencia menor es mucho mejor para plataformas en la nube que muestran datos en tiempo actual.
- **Tasa de pérdida de paquetes:** Es el porcentaje que presentan los paquetes que son transmitidos pero que no llegan al receptor, si se tiene un porcentaje alto significa que existen interferencias, posibles problemas de cobertura o hasta configuraciones erróneas.
- **Interferencia y ruido:** Indica cómo afecta la presencia de otros dispositivos electrónicos o fuentes de señal en la red.
- **Calidad de la señal:** Indica la integridad con la que llegan los datos a su destino, cuanto mejor sea la calidad mejor será la comunicación siendo esta confiable.
- **Escalabilidad y capacidad de conexión:** En esta parte se verifica si la red no presenta fallos al momento de que más dispositivos como sensores o nodos estén conectados a la red.

3.1.3. Configuración de The Things Network (TTN)

3.1.3.1. Registro y configuración de dispositivos

En esta sección se ejecutan varios pasos que permiten el registro y la configuración en la plataforma The Things Network (TTN), la cual se encarga de gestionar los dispositivos LoRaWAN.

Pasos para la incorporación y configuración de los dispositivos finales:

3.1.3.2. Registro de la aplicación en TTN

En el controlador TTN se crean dos aplicaciones, cada una de ellas como un identificador único que puntualmente se deriven para cada nodo Heltec tal como se ilustra en la figura 17, para adecuar la descripción para diferentes situaciones de testeo. Son las aplicaciones las que funcionan como recipientes lógicos de los dispositivos LoRaWAN.

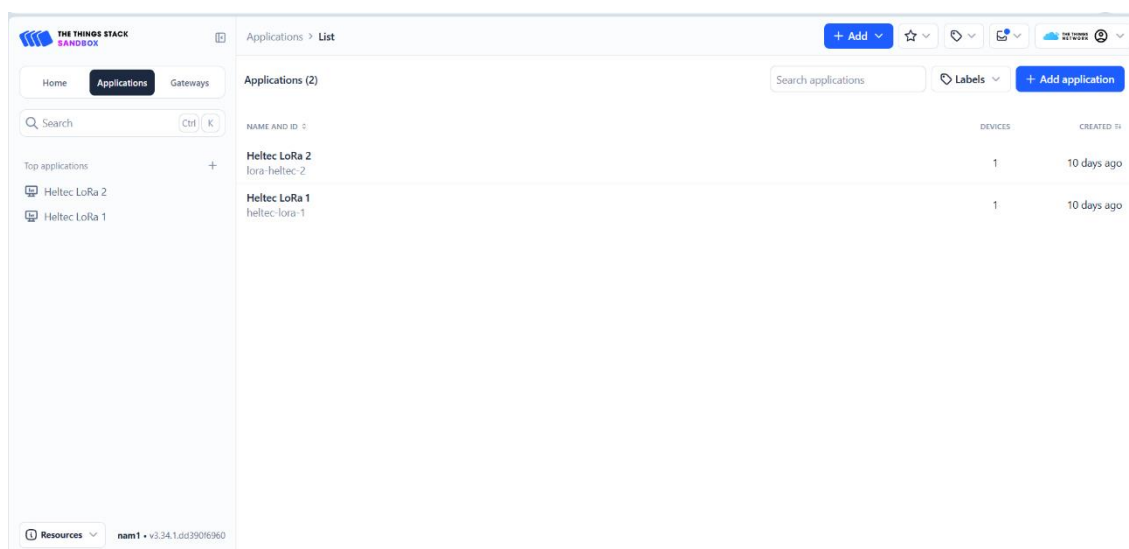


Figura 17. Registro de la Aplicación en TTN

3.1.3.3. Incorporación de dispositivos (End Devices)

El nodo Heltec LoRa 32 V3 cumple con el estándar LoRaWAN 1.0.3, y el proceso de activación se realizó a través del método de Over The Air Activation (OTAA). Se modificaron los parámetros de forma manual.

- DevEUI (identificador único del dispositivo)
- AppEUI (identificador de la aplicación)
- AppKey (clave para la autenticación y cifrado)

Mediante el procedimiento de los mensajes de tipos JoinRequest y JoinAccept, la operación también permite que los nodos se integren dinámicamente con la red TTN.

Mediante el procedimiento de los mensajes de tipos JoinRequest y JoinAccept, la operación también permite que los nodos se integren dinámicamente con la red TTN. En las figuras 18 y 19 se evidencia como quedaría la interfaz de cada uno de los nodos dentro de TTN.

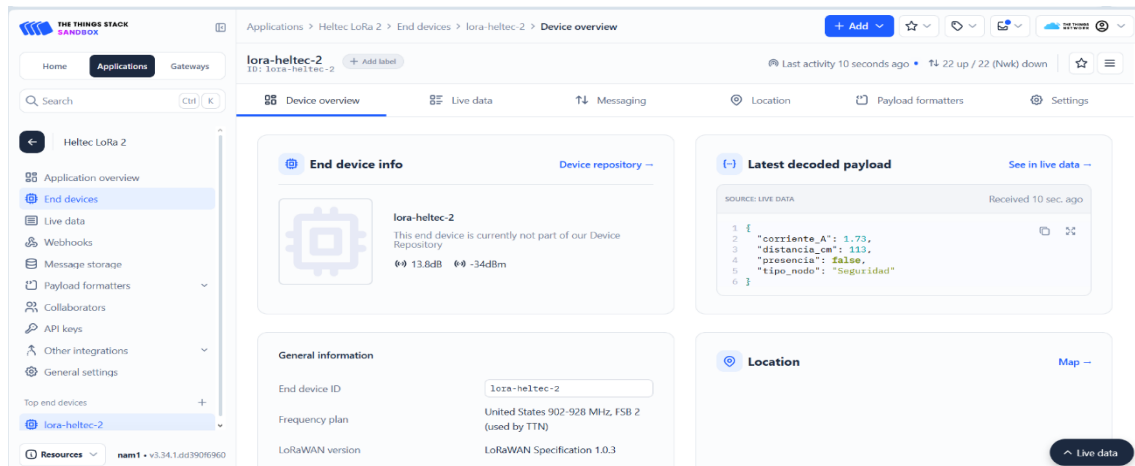


Figura 18. Incorporación de Dispositivos - Ambiente

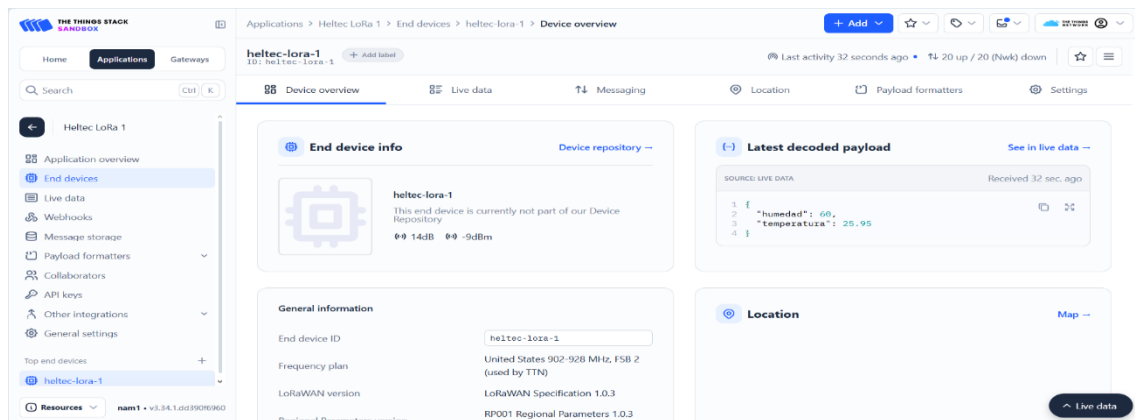


Figura 19. Incorporación de Dispositivos - Seguridad

3.1.3.4. Configuración del Gateway

Nos conectamos a la TTN utilizando un gateway Heltec M02 V2 configurado para reenviar paquetes LoRa en la tarea `nam1.cloud.thethings.network`. Se utilizaron los siguientes componentes en la configuración como se detalla en la figura 20:

- ID Gateway
- Área y rango de frecuencia LoRa (United States 902-928 MHz)

➤ sincronización horaria y conmutación de red.

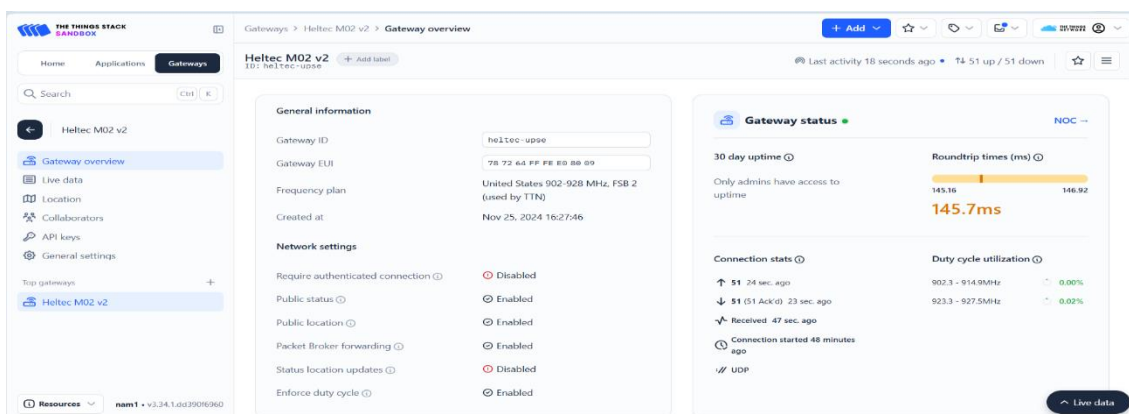


Figura 20. Configuración del Gateway

3.1.4. Integración con herramientas externas

Servicios como Ubidots para la supervisión y visualización de información facilitan el envío de datos obtenidos en TTN a señales de comando visuales a través de Webhooks o MQTT.

3.1.4.1. Visualización de variables en la plataforma Ubidots para los nodos ambiental y de seguridad.

En las figuras 21 y 22, se muestra la interfaz de la plataforma Ubidots, donde se visualiza la información enviada por dos nodos Heltec LoRa 32 V3, registrados como nodo-heltec1 y nodo-lora2. Estos nodos representan respectivamente los escenarios de monitoreo ambiental y de seguridad, dentro del entorno de pruebas desarrollado.

El nodo nodo-heltec1 reporta las siguientes variables:

- temperatura: 25.98 °C, correspondiente a la condición térmica del entorno simulado.
- humedad: 58.4 %, representando el nivel de humedad relativa.
- snr-heltec-upse: 13.8 dB, buena relación señal-ruido.
- rssi-heltec-upse: -10 dBm, excelente nivel de señal.
- Frame counter: 26 tramas transmitidas.
- F Port: 2, identificando el canal lógico de aplicación.

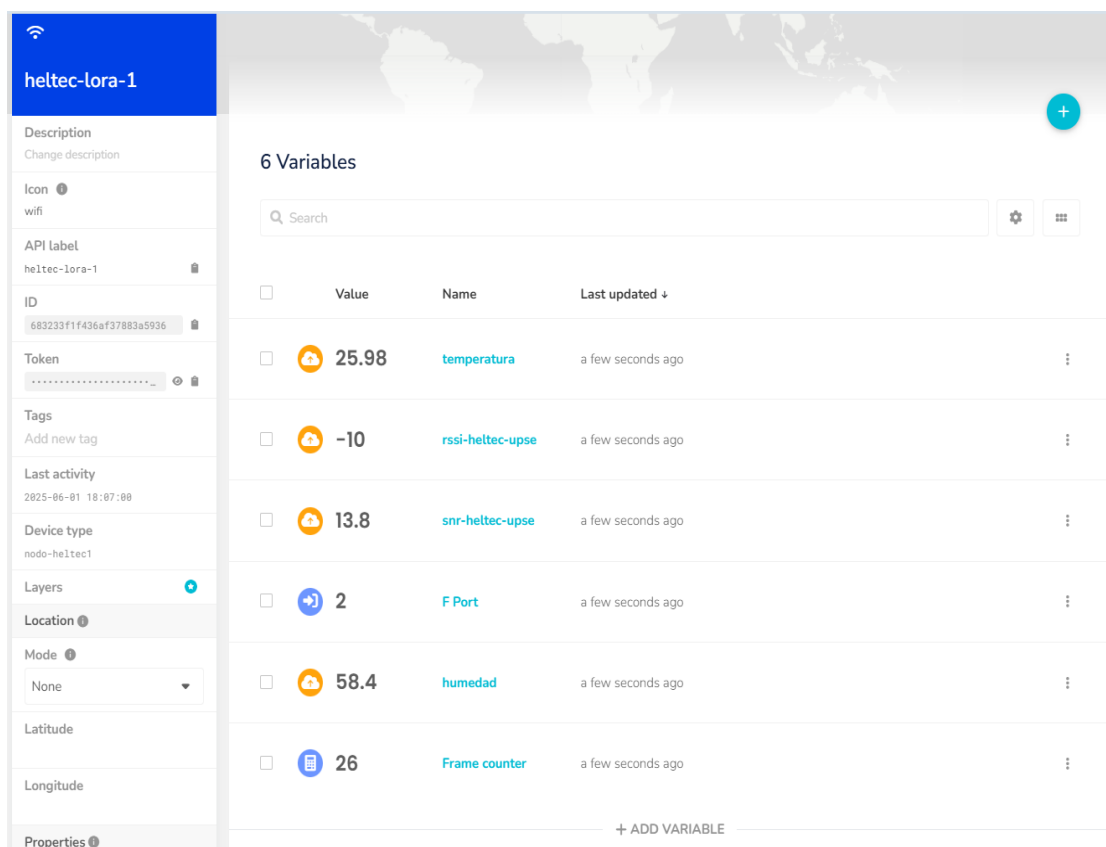


Figura 21. Interfaz de nodo de ambiente.

Por otro lado, el nodo nodo-lora2 orientado a seguridad, transmite las siguientes variables:

- presencia: 0, indicando ausencia de movimiento detectado por el sensor PIR.
- corriente_a: 2.27 A, simulando consumo energético en un equipo.
- distancia_cm: 78 cm, medida obtenida por sensor ultrasónico.
- snr-heltec-upse: 14 dB, señal con buena relación señal-ruido.
- rssi-heltec-upse: -26 dBm, nivel aceptable de señal.
- Frame counter: 33 tramas.
- F Port: 2, puerto lógico de transmisión.

The screenshot displays the '7 Variables' section of the TTN Node Security Interface. On the left, a sidebar contains various node details: Description (Change description), Icon (wifi), API label (lora-heltec-2), ID (68338e1785ee7b777761a53f), Token (masked), Tags (Add new tag), Last activity (2825-06-01 18:13:02), Device type (nodo-lora2), Layers (+), Location (Location), Mode (None), Latitude, Longitude, Properties (App ID, Dev Addr). The main area shows a table of 7 variables:

<input type="checkbox"/>	Value	Name	Last updated ↓	
<input type="checkbox"/>	14	snr-heltec-upse	a few seconds ago	⋮
<input type="checkbox"/>	2	F Port	a few seconds ago	⋮
<input type="checkbox"/>	0	presencia	a few seconds ago	⋮
<input type="checkbox"/>	-26	rssi-heltec-upse	a few seconds ago	⋮
<input type="checkbox"/>	33	Frame counter	a few seconds ago	⋮
<input type="checkbox"/>	2.27	corriente_a	a few seconds ago	⋮
<input type="checkbox"/>	78	distancia_cm	a few seconds ago	⋮

At the bottom right of the table, there is a '+ ADD VARIABLE' button.

Figura 22. Interfaz de nodo de seguridad

3.1.4.2. Verificación de conectividad y tráfico

Una vez implementado el equipamiento TTN, se realizó una evaluación de la conexión y el intercambio de información entre los nodos LoRa, el gateway y la red principal TTN. La verificación se llevó a cabo teniendo en cuenta varios factores técnicos:

- **Recepción de mensajes JoinRequest y envío de JoinAccept:**

Es necesario antes de ejecutar la transmisión de datos verificar que los nodos estén enlazados de manera adecuada, mediante el método OTAA (Over The Air Activation), dicha operación se comprueba mediante la consola de TTN, esta consola muestra la secuencia completa de conexión entre el nodo y el servidores sin la presencia de errores en la autenticación.

- **Análisis de tramas DataUp y DataDown:**

En este paso se revisa el envío de datos que transmite el nodo (tramas Confirmed Up) y la recepción de respuestas (Downlink ACK) desde la red, es decir que los datos que tienen verificación CRC_OK son recibidos sin pérdidas.

- **Parámetros de radiofrecuencia capturados:**

□RSSI (Received Signal Strength Indicator): En este escenario se presentan resultados en el rango de -81 dBm y -86 dBm, indicando que se encuentra dentro del rango permitido, aunque la señal se ve un poco afectada por la distancia que existe entre el dispositivo y el Gateway o también por los obstáculos físicos presentes es aceptable.

□SNR (Signal-to-Noise Ratio): Para este parámetro los resultados varían de 13.5 dB y 13.8 dB, valores aceptados para enlaces LoRa.

□Frecuencias activas: Se controlan los canales 902,5 MHz, 902,7 MHz, 903,1 MHz y 903,7 MHz de acuerdo con el modelo de salto de frecuencia establecido por LoRaWAN.

Modo de modulación y parámetros LoRa:

- Modulación: LoRa
- Spreading Factor: SF7
- Ancho de banda: 125 kHz
- Code Rate: 4/5

Dichos parámetros se mantuvieron constantes durante todas las tramas analizadas y, por lo tanto, podemos afirmar que fueron iguales para todas las pruebas.

▪ Revisión de contadores y secuencias:

Si en cada transmisión existe un incremento en el contador de las tramas indica que no se presenta pérdida de datos en la comunicación.

▪ Logs y decodificación de payloads:

Una vez receptado los paquetes se analizan mediante el decodificador de la plataforma TTN para que este interprete los datos transmitidos de cada nodo.

3.2. Diseño del escenario de monitoreo IoT para condiciones Ambientales y Seguridad

El diseño de entorno de pruebas se basa en la simulación e implementación de aplicaciones reales IoT, como sistemas de monitorización del entorno y de seguridad, para lograr esto, se diseñó la estructura, que comprende nodos LoRa que se pueden programar, un Gateway principal y un sistema backend para la gestión y visualización de la información, a continuación, se muestra en la figura 23 y 24 el esquema de la red, tanto para el escenario de ambiente como el de seguridad.

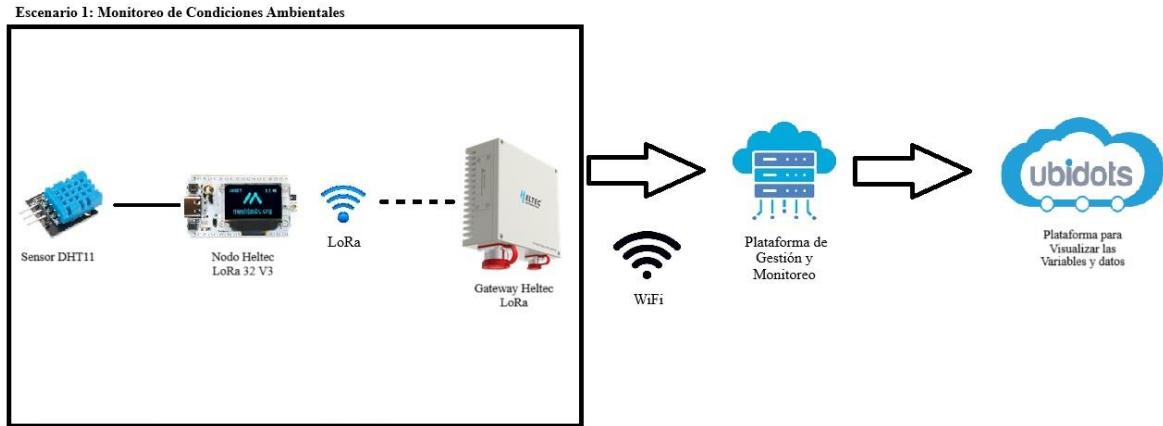


Figura 23 Esquema del Escenario de Ambiente

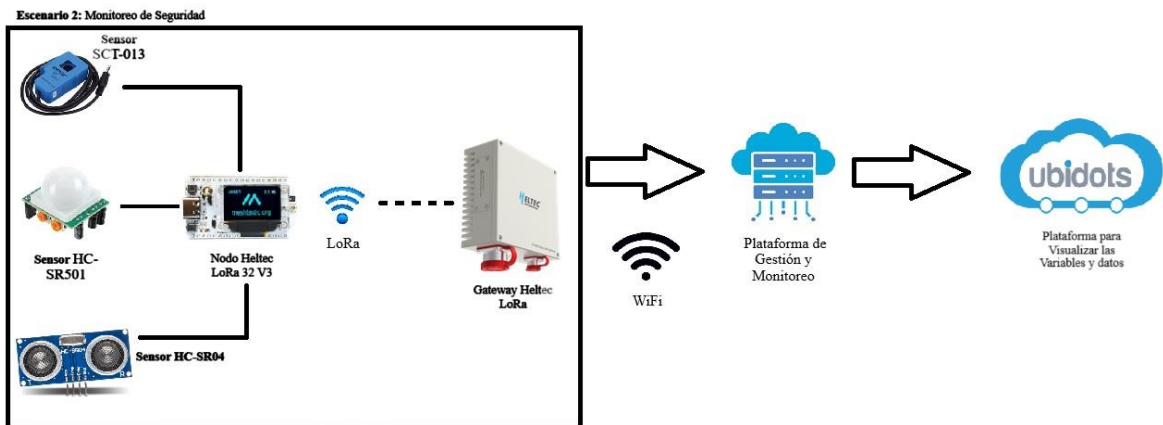


Figura 24 Esquema del Escenario de Seguridad

3.2.1. Variables a simular: Densidad y ubicación de nodos

Se tienen en cuenta dos decisiones principales: la densidad de los nodos y su ubicación física en la zona de evaluación, estas características afectan a la eficiencia de la red, las normas de comunicación y la propagación de la señal.

- **Densidad de nodos:** Se definen varias configuraciones experimentales cambiando el número de nodos activos, este parámetro permite analizar el comportamiento de la red cuando el número de colisiones simultáneas es bajo o alto, la pérdida de paquetes y el rendimiento.
- **Ubicación de nodos:** Las ubicaciones estratégicas se determinan en el laboratorio de telecomunicaciones teniendo en cuenta la visibilidad directa desde el Gateway, los obstáculos parciales y las ubicaciones dentro del laboratorio.

Los datos se envían a la plataforma de monitoreo TTN UBIDOT por cada nodo, que tiene un identificador distinto y está configurado para enviar gráficos periódicos de Gateway de enlace Heltec M02 V2.

3.2.2. Condiciones ambientales y factores de seguridad

Las aplicaciones IoT se utilizan principalmente para dos fines: la vigilancia del medio ambiente y la seguridad, se utilizan dos nodos que difieren en diseño y propósito.

- **Nodo de supervisión ambiental:** el DHT11 es un dispositivo que evalúa la temperatura y la humedad del entorno, los datos son enviados de manera periódica para verificar la estabilidad de la conexión y satisfacer las demandas bajo condiciones de transmisión continua. En la figura 23 se muestra la conexión física del sensor DHT11 al nodo Heltec LoRa 32 V3

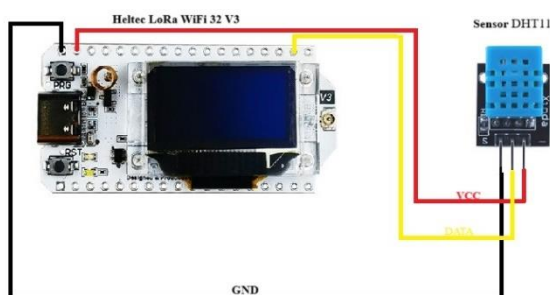


Figura 25. Conexiones de dispositivo para el nodo de ambiente

- **Nodo de seguridad:** equipado con sensores de corriente (SCT-013), sensores de movimiento (HC-SR501) y dispositivos de medición de distancia (HC-SR04), estos nodos generan información en los momentos de activación, lo que permite una evaluación temporal, para la conexión física de este escenario fue necesario contar con un protoboard como se puede observar en la figura 24.

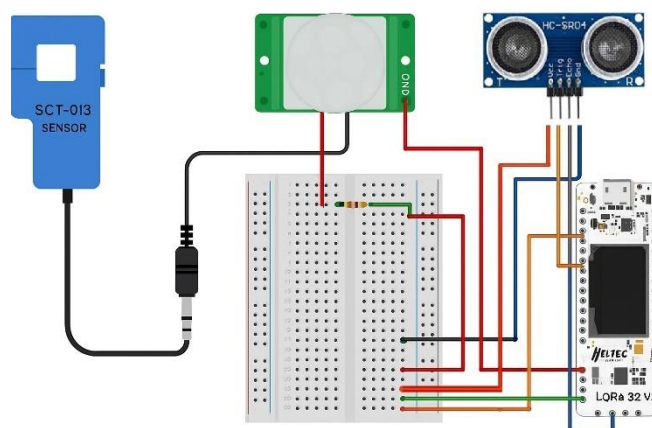


Figura 26. Conexiones de los dispositivos para el nodo de seguridad

3.3. Configuración de parámetros críticos de la Red LoRa

Una vez configurado la plataforma, el siguiente paso es registrar las condiciones ambientales del laboratorio, para evaluar las condiciones que existe entre los escenarios y los parámetros.

3.3.1. Spreading factor, Potencia de transmisión y ancho de banda

Los parámetros físicos que se presentan a continuación son elegidos por influir en el rendimiento de las redes LoRa, y a la vez permiten conocer el alcance de cobertura, la existencia de pérdida de paquetes y la latencia en cada escenario.

3.3.1.1. Spreading factor (SF)

Este término es utilizado para identificar cada símbolo transmitido, es decir si se presenta un mayor SF el envío de paquetes tarda más, disminuyendo la velocidad y mejorando la sensibilidad del receptor y cobertura de la señal, las clases de SF van desde SF7 hasta SF12.

3.3.1.2. Potencia de transmisión (TX Power)

Se conoce como la fuerza en la que es enviada una señal, es decir si esta aumenta alcanza distancias más largas y el paquete se envía adecuadamente, pero está a la vez va a consumir mayor energía, en este proyecto se realizan pruebas usando el rango compatible con los módulos LoRa en bandas ISM que son las potencias de 5 dBm a 14 dBm.

3.3.1.3. Ancho de banda (BW)

Indica el rango de frecuencia con la que trabaja una señal al ser transmitida, en los dispositivos Lora el rango más usado es de 125 kHz a 250 kHz, si el ancho de banda aumenta va a permitir que los datos lleguen con más velocidad, pero esta a su vez va a reducir la

sensibilidad del receptor, pero si el ancho de banda es menor aumenta la sensibilidad, pero el envío de paquetes será lento.

3.3.2. Impacto de los parámetros en el desempeño

3.3.2.1. Análisis del registro de paquetes capturados

Los datos recolectados durante la supervisión de las redes LoRa son usados para evaluar el impacto de los elementos físicos y la conectividad en la eficiencia de la comunicación entre nodos y Gateway, además se definen tramas de enlace Confirmed Uplink y Unconfirmed Downlink como se muestra en la figura 25.

- **Resultados obtenidos con configuraciones de SF7 y BW125/50**

LoRaWAN Packet Logger

Type: All DevAddr: Hide CRC_ERR Packet

Total: 18 Uplink: 9 Downlink: 9 Pause Clear Download

Mtype	Time	Freq	Rssi	SNR	CRC	Mode	CodeRate	DataRate	CNT
Unconfirmed Down	15:27:27	924.5			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	109 DevAddr: 260CAA26
Confirmed Up	15:27:26	902.7	-45	10	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	108 DevAddr: 260CAA26 FPort: 2 Payload: 02 D1 2A B6 A6
Unconfirmed Down	15:26:49	927.5			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	106 DevAddr: 260C8CA9
Confirmed Up	15:26:48	903.7	-43	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	106 DevAddr: 260C8CA9 FPort: 2 Payload: 02 B7 E5 BA B5
Unconfirmed Down	15:26:28	927.5			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	108 DevAddr: 260CAA26
Confirmed Up	15:26:27	903.7	-45	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	107 DevAddr: 260CAA26 FPort: 2 Payload: 02 F6 7F 1A 88
Unconfirmed Down	15:25:48	923.9			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	105 DevAddr: 260C8CA9
Confirmed Up	15:25:48	902.5	-43	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	105 DevAddr: 260C8CA9 FPort: 2 Payload: 02 35 AE 25 CF
Unconfirmed Down	15:25:28	925.1			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	107 DevAddr: 260CAA26
Confirmed Up	15:25:27	902.9	-45	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	106 DevAddr: 260CAA26 FPort: 2 Payload: 02 65 E3 5A 03
Unconfirmed Down	15:25:19	925.7			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	104 DevAddr: 260C8CA9

Figura 27. Intensidad de señal (RSSI) y relación señal-ruido (SNR)

- **Intensidad de señal (RSSI) y relación señal-ruido (SNR)**

En la conexión Uplink los resultados de los niveles de RSSI se mantienen en el rango de -44 dBm a -45 dBm, es decir que la señal concuerda con las pruebas realizadas en el laboratorio.

Los valores obtenidos del SRN su rango es de 13.5 dB y 14.5 dB, indicando que se presenta un poco de ruido en la transmisión, pero la señal deseada es mayor, determinando que con ayuda de técnicas de modulación se puede mejorar el escenario.

- **Spreading factor (SF) y Ancho de banda (BW)**

Se hace uso del spread factor 7 para el envío de paquetes usando una frecuencia que se encuentre dentro del rango de 125 KHz y 500 KHz BW, al elegir entre estas frecuencias permite que exista una velocidad de transmisión aceptable, además haciendo uso del SF7 se obtienen altas velocidades con un menor ancho de banda, lo cual favorece a escenarios de cortas distancias, se realiza el envío a 500 kHz de BW de las tramas de enlace Downlink, el resultado obtenido es un mensaje Unconfirmed Downlink, es decir no presentan valores de RSSI/SNR en la recepción de estos paquetes, esto indica que puede existir un límite en la captura por parte del gateway.

- **Integridad de los paquetes (CRC)**

En este caso el resultado para los paquetes Uplink muestran un mensaje de CRC_OK, dando a entender que los datos se han enviados de manera correcta sin la presencia de error en el proceso de transmisión, para los paquetes Downlink muestran lo contrario con un mensaje de NO_CRC, indicando que se presentan problemas que pueden ser por parte del Gateway al no admitir verificación de CRC en algunos paquetes de bajada o también puede ser que el CRC no fue configurado correctamente en el backend de la red, este resultado no afecta el rendimiento de los nodos ya que se toma en cuenta solo la validación de los Uplink.

- **Dispositivos activos y tráfico**

Se encontraron dos direcciones de dispositivo (DevAddr) 260C8CA9 y 260CAA26, lo que indica que había dos nodos activos durante el experimento. Los valores del campo CNT siguió aumentando, lo que confirma que se estaban enviando y recibiendo paquetes sin pérdidas.

3.4 Diseño de pruebas para evaluar calidad de señal y cobertura

La calidad de señal y cobertura en redes LoRa son parámetros necesarios a evaluar, estos sirven para comprobar que exista una transmisión exitosa, como también verificar el rango de alcance de los dispositivos y comprobar la existencia de áreas pocos favorables.

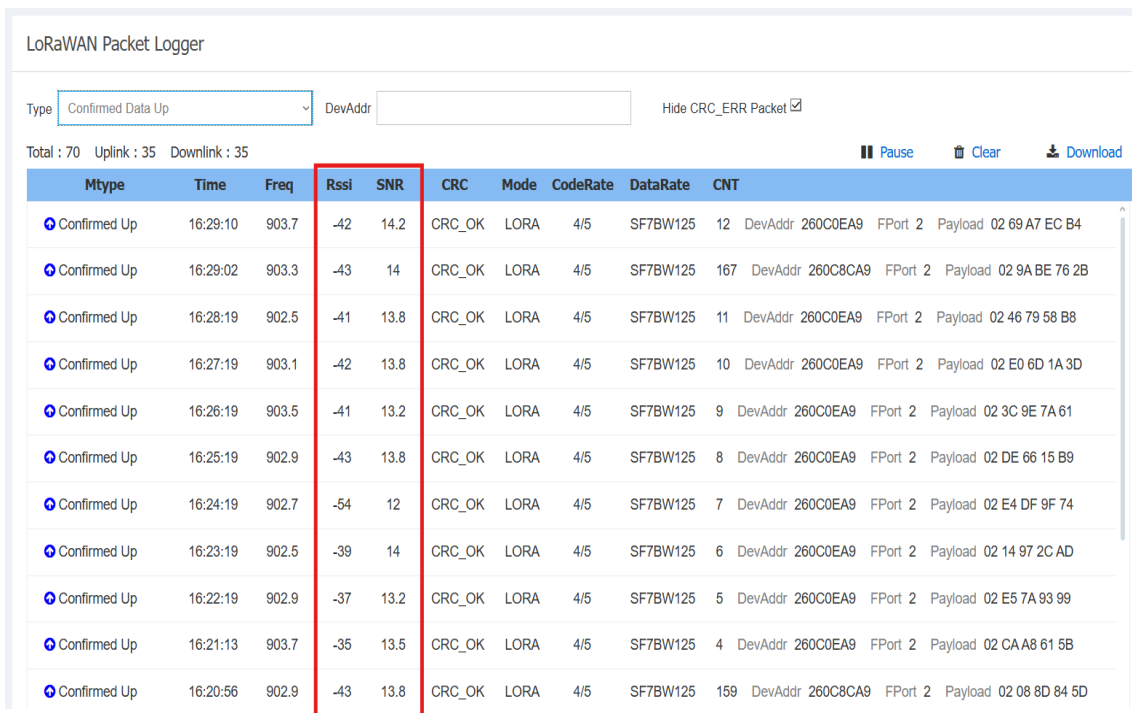
3.4.1. Calidad de señal en diferentes ubicaciones

- RSSI (Indicador de Buena Intensidad de Señal): Se trata de la fuerza con la que llega al aparato para recibir, si salen números negativos quiere decir que hay menos fuerza.
- SNR (Relación de Señal a Ruido): Mide la conexión entre una señal útil y ruido; un resultado positivo quiere decir buena calidad de señal mientras que los resultados malos muestran que hay más ruido.

Para hacer las mediciones se escogen lugares dentro del espacio controlado a una distancia de 20m, 50m y 100m.

3.4.1.1. Áreas sin obstáculo, distancia 20 m

Este escenario tuvo lugar en un espacio abierto sin la presencia de barreras físicas entre los nodos y el Gateway. La línea de vista directa ha proporcionado condiciones óptimas para la distribución de la señal como lo muestra la figura 26. Este entorno sirve como una relación básica para comparar las consecuencias de la persecución en condiciones ideales.



LoRaWAN Packet Logger

Type: DevAddr: Hide CRC_ERR Packet

Total : 70 Uplink : 35 Downlink : 35 || Pause 🗑 Clear 📄 Download

Mtype	Time	Freq	Rssi	SNR	CRC	Mode	CodeRate	DataRate	CNT	DevAddr	FPort	Payload
Confirmed Up	16:29:10	903.7	-42	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	12	260C0EA9	FPort 2	02 69 A7 EC B4
Confirmed Up	16:29:02	903.3	-43	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	167	260C8CA9	FPort 2	02 9A BE 76 2B
Confirmed Up	16:28:19	902.5	-41	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	11	260C0EA9	FPort 2	02 46 79 58 B8
Confirmed Up	16:27:19	903.1	-42	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	10	260C0EA9	FPort 2	02 E0 6D 1A 3D
Confirmed Up	16:26:19	903.5	-41	13.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	9	260C0EA9	FPort 2	02 3C 9E 7A 61
Confirmed Up	16:25:19	902.9	-43	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	8	260C0EA9	FPort 2	02 DE 66 15 B9
Confirmed Up	16:24:19	902.7	-54	12	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	7	260C0EA9	FPort 2	02 E4 DF 9F 74
Confirmed Up	16:23:19	902.5	-39	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	6	260C0EA9	FPort 2	02 14 97 2C AD
Confirmed Up	16:22:19	902.9	-37	13.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	5	260C0EA9	FPort 2	02 E5 7A 93 99
Confirmed Up	16:21:13	903.7	-35	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	4	260C0EA9	FPort 2	02 CAA8 61 5B
Confirmed Up	16:20:56	902.9	-43	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	159	260C8CA9	FPort 2	02 08 8D 84 5D

Figura 28. Análisis de áreas sin obstáculo

Al tener línea de vista directa y sin presencia de barreras físicas entre el nodo emisor y el Gateway, se observaron condiciones óptimas de enlace. Los resultados reflejan un comportamiento eficiente del canal de comunicación, en la tabla 8 se muestran a detalle los resultados obtenidos de cada parámetro.

Tabla 8. Análisis de cada parámetro para el escenario sin obstáculo

Análisis de cada parámetro para el escenario sin obstáculo.	
RSSI	<p>La mayoría de las muestras registran valores de RSSI entre -37 dBm y -43 dBm, lo que indica una señal muy fuerte y estable, existe una lectura aislada a -54 dBm, que, aunque es más baja, sigue siendo aceptable para comunicación LoRa en este entorno, valores cercanos a -40 dBm reflejan una excelente calidad de enlace, típico en condiciones ideales de línea de vista directa.</p>
SNR	<p>Varía entre 10.8 dB y 14.2 dB, lo que indica que la señal está muy por encima del ruido ambiental, valores de SNR superiores a 10 dB en LoRa son indicativos de un enlace robusto con baja probabilidad de errores.</p>
CRC_OK	<p>Todos los paquetes presentan verificación CRC exitosa, confirmando integridad en la transmisión y recepción, esto demuestra un canal estable y libre de interferencias significativas.</p>

3.4.1.2. Interiores con muros y obstáculos, distancia 50 m.

En este caso, la transmisión se efectuó desde el exterior del laboratorio, con al menos dos muros intermedios entre el nodo LoRa y el Gateway. Se introducen obstáculos típicos de un entorno universitario o institucional, como paredes de concreto, mobiliario y puertas. Este escenario simula condiciones de atenuación moderada, donde se espera una degradación en los parámetros de enlace, como el RSSI y el SNR, tal como se aprecia en la figura 27.

LoRaWAN Packet Logger

Type: Confirmed Data Up DevAddr: 260C0EA9 Hide CRC_ERR Packet

Total : 116 Uplink : 58 Downlink : 58 Pause Clear Download

Mtype	Time	Freq	Rssi	SNR	CRC	Mode	CodeRate	DataRate	CNT
Confirmed Up	16:43:20	903.7	-63	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	26
Confirmed Up	16:43:07	903.7	-63	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	26
Confirmed Up	16:42:08	902.7	-70	9.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	25
Confirmed Up	16:41:08	902.9	-66	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	24
Confirmed Up	16:40:08	902.7	-65	11	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	23
Confirmed Up	16:39:15	903.7	-41	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	22
Confirmed Up	16:39:08	903.7	-41	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	22
Confirmed Up	16:38:09	903.3	-43	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	21
Confirmed Up	16:37:13	902.3	-51	14.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	20
Confirmed Up	16:37:09	902.3	-51	14.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	20
Confirmed Up	16:34:19	902.5	-40	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	17

Figura 29. Análisis de áreas con obstáculo

En la Tabla 9 se detalla minuciosamente los resultados obtenidos de este escenario, aunque no es un entorno favorable por los obstáculos presentes, sin embargo, la red mantuvo un comportamiento favorable.

Tabla 9. Análisis de cada parámetro para el escenario con obstáculo

Análisis de cada parámetro para el escenario con obstáculo.	
RSSI	En comparación con el primer escenario la señal en este caso es débil, mostrando valores de -62 dBm y -70 dBm lo que significa que está entre los rangos de acuerdo a lo esperado por los obstáculos y estructuras en el área.

SNR	Un dato a tomar en cuenta es que si el valor de SNR se encuentra por encima de los 10 dB garantiza una buena transmisión caso contrario la señal puede verse afectada, emn este cso nos da valores entre 9.8 dB y 14,2 dB indicando que existe una buena transmisión y es aceptada por el equipo.
CRC OK	Los paquetes tienen verificación CRC exitosa, aunque los otros parámetros hayan variados la transmisión se realiza de manera adecuada.

3.4.1.3. Rincones o lugares lejos desde el punto de acceso, distancia 100m.

Se posicionó el nodo en una ubicación lejana respecto al gateway, con múltiples obstrucciones en el trayecto, incluyendo paredes, estructuras metálicas y posibles interferencias. Este escenario representa condiciones adversas de propagación, con zonas de baja cobertura o "zonas muertas", y permite evaluar la capacidad de resiliencia del enlace ante pérdida de señal e interferencias como se detalla en la figura 28.

LoRaWAN Packet Logger

Type: Confirmed Data Up DevAddr: 260CE9AF Hide CRC_ERR Packet

Total : 26 Uplink : 13 Downlink : 13 || Pause Clear Download

Mtype	Time	Freq	Rssi	SNR	CRC	Mode	CodeRate	DataRate	CNT
Confirmed Up	16:58:51	903.5	-81	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	5
Confirmed Up	16:57:52	903.7	-82	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	4
Confirmed Up	16:57:38	903.1	-86	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	3
Confirmed Up	16:56:53	903.1	-86	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	3
Confirmed Up	16:55:54	902.5	-83	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	2
Confirmed Up	16:55:36	902.7	-82	10.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Confirmed Up	16:54:54	902.7	-82	10.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Confirmed Up	16:53:53	902.5	-83	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	0

Figura 30. Rincones o lugares lejos desde el punto de acceso

Este escenario representa una condición más exigente para la comunicación LoRa, dado que el nodo se encuentra a una distancia considerable y en una ubicación con posible pérdida de línea de vista directa. A pesar de estas condiciones, el sistema mantiene un nivel de desempeño aceptable, como lo muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Análisis de cada parámetro para el escenario lejano.

Análisis de cada parámetro para el escenario lejano.	
RSSI	Los valores obtenidos en este caso varían de -81 dBm y -86 dBm, haciendo una comparación con los otros escenarios esta muestra datos de señales más débil y es lo que se estima a esta distancia.
SNR	Aunque la señal es débil, los valores SNR son sorprendentemente buenos, oscilan entre 10.2 dB y 13.8 dB, lo que indica que, pese a la atenuación, el nivel de ruido en el canal sigue siendo bajo.
CRC_OK	Todos los paquetes llegaron íntegros, sin errores de CRC, alta confiabilidad, a pesar de la señal débil.

A continuación, se muestra la tabla 11 en donde se detallan y se comparan los resultados de cada parámetro en los tres escenarios.

- RSSI se debilita a medida que aumenta la distancia y los obstáculos, según lo previsto para el entorno inalámbrico.
- El SNR permanece en buenos intervalos, incluso a 100 m lo que indica una buena transmisión.
- El CRC es excelente en los tres escenarios, dando como resultados positivos en las aplicaciones de IoT
- La frecuencia permanece estable en el rango permitido.

Tabla 11. Resultados de los tres escenarios

Parámetro	20 m	50 m	100 m
RSSI	-37 dBm a -43 dBm	-62 dBm a -70 dBm	-81 dBm a -86 dBm
SNR	10.8 dB a 14.2 dB	9.8 dB a 14.2 dB	10.2 dB a 13.8 dB
CRC_OK	100% de los paquetes correctos	100% de los paquetes correctos	100% de los paquetes correctos

3.5 Pruebas de resiliencia frente a interferencias y ruido

La resistencia a la red de Lora se encarga de garantizar una transmisión de datos confiable en un entorno con condiciones electromagnéticas adversas por este motivo en esta sección se pone a prueba la resistencia de la red a la interferencia que son causadas por otros dispositivos Lora que funcionan a la misma frecuencia, ancho de banda y propagación, también se analizan estrategias para reducir estos efectos y garantizar la integridad de los enlaces en la densidad del canal o escenarios de sobrecarga.

3.5.1. Evaluación de interferencias en la Red LoRa

Para evaluar la estructura de la red Lora contra las interferencias activas, es necesario el nodo TTGO Lora T3 V1.6.1 el mismo que se usa como un emisor de paquete Lora deliberado configurado para transmitir continuamente a la misma frecuencia y configuración que Heltec Lora 32 V3, además se tiene como objetivo simular un entorno mixto con interferencias activas a nivel de canal físico.

3.5.1.1. Configuración del nodo interferente (TTGO T3)

- Frecuencia: 903.3 MHz
- Spreading Factor: SF7
- Bandwidth: 125 kHz
- Potencia de transmisión: 20 dBm
- Intervalo de transmisión: cada 50 ms
- Tipo de trama: Unconfirmed con payload fijo

3.5.1.2. Condiciones de prueba

- Gateway Heltec HT-M02 V2 configurado con frecuencia multicanal para recepción.
- Nodos Heltec transmitiendo Confirmed Up a intervalos de 5 a 10 segundos.

- Nodo TTGO encendido durante ciclos de 3 a 5 minutos como fuente de interferencia activa.

Como se muestra en la figura 29, nos da valores RSSI de -43 a -45 dBm, mientras que SNR está en el rango de 13.5-14.9 dB, dejando como resultado un gran enlace, con un RSSI bastante fuerte (por encima de -50 dBm) y SNR alto (muy por encima del umbral mínimo, que generalmente es de -20 dB para LoRa).

The screenshot shows the 'LoRaWAN Packet Logger' interface with a table of 16 confirmed uplink packets. The table columns are: Mtype, Time, Freq, Rssi, SNR, CRC, Mode, CodeRate, DataRate, and CNT. The Rssi values range from -37 to -45 dBm, and SNR values range from 13.8 to 16.2 dB. All packets are confirmed and have a CRC_OK status.

Mtype	Time	Freq	Rssi	SNR	CRC	Mode	CodeRate	DataRate	CNT
Confirmed Up	22:24:18	902.3	-45	16.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	2
Confirmed Up	22:24:14	902.3	-45	15.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	2
Confirmed Up	22:24:09	902.3	-43	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	2
Confirmed Up	22:24:04	902.3	-45	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Confirmed Up	22:23:18	902.3	-45	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Confirmed Up	22:23:13	902.3	-43	14.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Confirmed Up	22:23:09	902.3	-42	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Confirmed Up	22:23:04	902.3	-43	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Confirmed Up	22:22:20	902.3	-40	14.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	0
Confirmed Up	22:22:15	902.3	-40	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	0
Confirmed Up	22:22:10	902.3	-40	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	0
Confirmed Up	22:22:05	902.3	-39	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	0
Confirmed Up	22:22:01	902.3	-36	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	0
Confirmed Up	22:21:57	902.3	-37	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	0
Confirmed Up	22:21:18	902.3	-51	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1

Figura 31. Datos antes de interferencia.

La figura 30 muestra el resultado de interferencia que se obtiene mediante la configuración previa del nodo TTGO T3.

The screenshot shows the 'LoRaWAN Packet Logger' interface with a table of 15 unconfirmed uplink packets. The table columns are: Mtype, Time, Freq, Rssi, SNR, CRC, Mode, CodeRate, DataRate, and CNT. The Rssi values range from -7 to -14 dBm, and SNR values range from -7 to 19 dB. All packets are unconfirmed and have a CRC_OK status. Several rows are highlighted with red boxes.

Mtype	Time	Freq	Rssi	SNR	CRC	Mode	CodeRate	DataRate	CNT
Unconfirmed Up	22:53:10	903.1	-7	-7	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	33
Unconfirmed Up	22:53:06	902.3	-14	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	32
Unconfirmed Up	22:53:03	902.3	-14	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	31
Unconfirmed Up	22:53:00	902.3	-14	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	30
Unconfirmed Up	22:52:57	902.3	-14	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	29
Unconfirmed Up	22:52:53	902.3	-14	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	28
Unconfirmed Up	22:52:50	902.3	-14	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	27
Unconfirmed Up	22:52:47	902.3	-14	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	26
Unconfirmed Up	22:52:44	902.3	-14	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	25
Unconfirmed Up	22:52:40	902.3	-14	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	24
Unconfirmed Up	22:52:37	902.3	-14	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	23
Unconfirmed Up	22:52:34	902.7	-8	-8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	22
Unconfirmed Up	22:52:30	902.3	-14	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	21
Unconfirmed Up	22:52:27	902.3	-14	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	20
Unconfirmed Up	22:52:23	903.1	-7	-7.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	19

Figura 32. Resultados del nodo interferente

Observaciones:

- La SNR promedio tuvo un valor diminutivo de 14 dB a -7 a -8 dB, lo que indica presencia de ruido.
- RSSI permanece estable entre -14 dBm, pero con la presencia de interferencias este valor llego de -69 a -77 dBm.
- Incremento de paquetes con CRC inválido: la consola gateway informa la parcela CRC_ER, presencia de colisión.
- Retransmisiones de Confirmed Up: se observa repetición de valores de contador CNT, sugiriendo que el nodo Heltec no ha recibido la puerta de enlace correctamente debido a colisiones.
- Caída en el tráfico registrado por la puerta de enlace: algunos paquetes enviados por nodos no estaban registrados en el Packet Logger.

Este comportamiento puede explicarse por la forma en que TTN gestiona los canales y parámetros físicos del enlace, lo cual hace que interferir sistemáticamente una red LoRaWAN bien configurada sea una tarea compleja:

- **Salto de frecuencia (Frequency Hopping):** Cuando un nodo LoRaWAN se une a TTN por OTAA, se le asignan hasta 8 canales uplink por defecto (en US915: 902.3–903.7 MHz) en donde cada transmisión sucesiva es enviada en un canal distinto, siguiendo un patrón pseudoaleatorio de salto de frecuencia.
- **ADR y control de parámetros por red:** TTN habilita el uso de ADR (Adaptive Data Rate), que permite a la red ajustar dinámicamente el SF y la potencia de transmisión de cada nodo según las condiciones de enlace. De esta forma, los nodos con buena cobertura pueden reducir su SF, acortando el tiempo en aire y disminuyendo la probabilidad de interferencias, mientras que los nodos lejanos pueden mantener enlaces estables usando SF altos solo cuando es necesario.

3.5.2. Estrategias para Mitigación de Interferencias

Las redes de LoRaWAN que operan con la banda ISM, su probabilidad de interferencia es alta debido a la coexistencia con tecnologías como WiFi, Bluetooth y otros sistemas Lora cercanos, se debe tomar en cuenta si el canal y los parámetros físicos no están configurados adecuadamente, también puede existir colisiones internas donde los nodos mismos interfieren entre sí.

3.5.2.1. Diversificación de canales LoRa (Multicanal TTN)

The Things Network (TTN) administra varios canales de comunicación en el Grupo ISM de 915 MHz en América (US915), según lo que es el Over-The-Air Activation (OTAA), el servidor TTN proporciona dinámicamente la lista de frecuencia de transmisión (ascendente) y las frecuencias para reducir el enlace, lo que permite que cada nodo use otro canal en cada transmisión por frecuencia.

3.5.2.2. Aumento del Spreading Factor (SF) bajo condiciones de ruido

SF9, SF10 o incluso SF12 aumenta la sensibilidad del receptor y mejora la relación de señal/ruido mínimo necesaria para una decodificación exitosa, es decir esto se debe a que el SF mayor con el tiempo expande el espectro, lo que facilita la señal en presencia de trastornos de conducto incluso refrescantes

3.5.2.3. Asignación distribuida de parámetros LoRa en nodos

En redes cercanas, se recomienda que los nodos no tengan la misma frecuencia exacta, SF y ancho de banda (BW), se sigue los siguientes pasos para lograr la correcta distribución de los parámetros.

- Configuración de nodos con diferentes SF si no se usa ADR.
- Frecuencias de la habitación si la red es privada.
- Habilitar el ADR (velocidad de transmisión de datos adaptativos) en los puntos TTN Hub para que TTN pueda ajustar automáticamente los parámetros de acuerdo con la calidad del enlace.

3.5.2.4. Regulación del duty cycle y espaciamiento temporal

Uno de los errores más comunes en el entorno de prueba es configurar nodos con intervalos de transmisión muy cortos (como cada 1-5 segundos), saturar el canal y reducir drásticamente el rendimiento general de la red.

3.5.2.5. Minimizar interferencias intra-red (mismo SF y canal).

El peor escenario ocurre cuando varios nodos transmiten simultáneamente, a la misma frecuencia y con el mismo SF, este problema pasa porque Lora no usa CSMA/CA como Wi – fi, es decir no revela si el canal está ocupado lo que causa colisiones.

3.6 Implementación de pruebas para evaluar consumo de energía

Para realizar esta implementación, se ha crea un protocolo de medición usando los dispositivos probados (DUT), los nodos LORA se basan en la placa HELTC LORA32

V3 equipada con un microcontrolador ESP32 y el módulo LORA integrado, para diseñar los escenarios de IoT reales, se integran sensores adicionales, incluido el sensor de humedad y temperatura DHT11, el sensor de potencia SC013 y el sensor de dormitorio de residencia PIR HC-SR501.

La tabla 12 proporciona un resumen del consumo aproximado de los componentes principales en varias condiciones de funcionamiento principal.

3.6.1. Impacto de configuraciones de transmisión en el consumo de batería

Para comprender los efectos de las configuraciones de transmisión de Lora en el consumo de batería, es importante considerar cómo el coeficiente de propagación (SF), el ancho de banda (BW) y la potencia de transmisión (potencia TX) interactúan para determinar los paquetes en el aire (TOA) y la potencia instantánea durante la transmisión. En la figura 33 se muestra como el sensor ACS712 se utilizó para las mediciones de cada sensor y nodos.

Se toma en cuenta que un ToA más largo y con mayor corriente continua se convierten directamente en un mayor consumo de energía para cada transmisión, en la tabla 12 se detalla el consumo aproximado de cada componente.

Tabla 12. Consumo energético de los componentes principales

Componente / Estado	Consumo Aproximado	Condiciones
Heltec LoRa32 V3 (activo)	20 – 50 mA	Sin pantalla OLED, sin WiFi, solo usando LoRa para transmitir.
Heltec LoRa32 V3 (TX LoRa)	80 – 130 mA (pico)	Durante transmisión LoRa (usualmente <2 segundos).
Heltec LoRa32 V3 (deep sleep)	10 – 20 μ A	CPU dormida, LoRa y sensores inactivos, ideal para optimización energética.
DHT11 (humedad/temperatura)	0.3 – 2.5 mA	En lectura activa. Consumo muy bajo.
SC013 (sensor de corriente ACS712 o similar)	~10 mA (máx)	Depende del sensor exacto y referencia, algunos usan amplificadores.
HC-SR501 (presencia PIR)	~50 μ A en reposo ~150 μ A al detectar movimiento	Muy eficiente, ideal para sistemas de bajo consumo.
HC-SR04 (ultrasónico)	15 – 20 mA (activo)	Solo cuando se está haciendo la medición (ciclo de unos milisegundos).

TOTAL ESTIMADO (ciclo activo)	~100 – 160 mA (máximo)	Solo durante unos segundos durante lectura y transmisión.
TOTAL ESTIMADO (en reposo o sleep)	<30 μ A	Si se implementa deep sleep correctamente y se desconectan sensores.

Para la medición se utilizó un sensor de corriente ACS712, de la cual se midieron los datos mostrados en la tabla 12 para cada sensor y nodos. En la figura 33 se muestra el esquema del sensor conectado a los nodos.

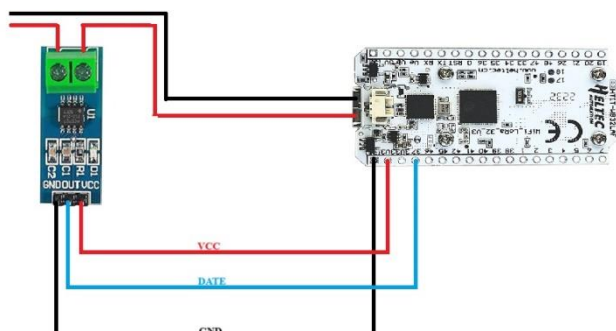


Figura 33 Sensor ACS712 a Nodo Heltec LoRa 32 V3

Estimaciones principales:

- **Corriente pico (TX LoRa):** Se estima que cambia en el rango de 80 a 130 mA, ya que es más alto con un BW más alto y menos estrecho, si la capacidad de transmisión es menor (17 dBm a 20 dBm) reduce el pico.
- **Tiempo en el aire (ToA):** Este es un factor dominante en el consumo de energía por día, si aumenta exponencialmente con SF y cae con un BW más amplio, se usa valores TOA típicos para el paquete de 20 bytes.
- **Energía por paquete (mJ):** Calculado como potencia de salida (voltaje de operación * corriente media debajo de TX) y tiempo en el aire, se utiliza el voltaje de trabajo nominal de la placa que es de 3.3 V
- **Corriente promedio del ciclo:** Incluye el consumo en modo deep sleep (10-20 μ A), el consumo activo (20-50 mA, sin contar TX), y el consumo durante la transmisión.

3.6.1.1. Tabla de consumo energético para configuraciones de transmisión LoRa

La siguiente tabla 13 proporciona una evaluación de los resultados del consumo de energía de las pruebas de configuración de transmisión, teniendo en cuenta el consumo de hardware y las características de Lora:

Tabla 13. Consumo Energético para Configuraciones de Transmisión LoRa

Prueba	SF	BW (kHz)	Tx Power (dBm)	ToA Estimado (ms) *	Corriente Pico TX Estimada (mA)	Energía por Paquete Estimada (mJ) **	Comentarios de Consumo
1	SF7	125	20	~61	110	20	Configuración base. Consumo por paquete eficiente.
2	SF9	125	20	~247	115	85	ToA y energía cuatro veces mayor que SF7. Mayor consumo.
3	SF12	125	20	~1974	125	650	Máximo consumo por paquete. ToA extremadamente largo.
4	SF7	250	20	~31	110	10	Más eficiente que 125 kHz. Menor ToA, menor energía por paquete.
5	SF12	250	20	~987	125	325	Alto SF domina el ToA, pero BW más amplio lo reduce a la mitad vs. Prueba 3.
6	SF7	125	17	~61	85	15	Ahorro significativo. Reducción de potencia disminuye corriente pico.
7	SF12	125	17	~1974	95	590	Reducción de potencia ayuda, pero SF12 sigue siendo el principal factor.
8	SF7 (LoRa)	125	20	~61	110	20	Referencia para LoRa.

3.6.1.2. Análisis del Impacto de las Configuraciones

1. Spreading Factor (SF): El mayor consumidor:

- La prueba 1,2 y 3, presentaron un SF mayor que las otras pruebas en cuanto al consumo de energía por año, es decir aumentándolo y a la vez el SF duplica su valor en TOA.
- La prueba 1 presenta un mayor consumo de paquetes que la prueba 1 esto depende del tipo de SF utilizado, en este caso se recomienda usar un SF bajo, esto no afecta a la comunicación, pero sí permite que la batería sea más duradera.

2. Ancho de Banda (BW): Complemento al SF:

- Realizando la comparación de la primera prueba (SF7, 125 kHz) con la prueba 4 (SF7, 250 kHz), está claro que el aumento del ancho de banda reduce el TOA y también el consumo de energía.
- La prueba 5 (SF12, 250 kHz) muestra que incluso con el BW más alto de SF puede reducir la energía por día, en comparación con un BW más estrecho (en comparación con la prueba 3), aunque el SF dominante sigue siendo alto.

3. Potencia de transmisión (Tx Power): Impacto directo en el pico:

- Los resultados de las pruebas 6 y 7 en comparación con la prueba inicial este disminuye el proceso de transmisión a la vez también reduce la corriente máxima, es decir se encuentra por debajo del TX, dando como resultado una disminución de potencia lo que significa que aumenta la operación de la batería cuando la recepción de señal se encuentre en un rango aceptable.

4. Comparación LoRa vs. FSK (Prueba 8):

- En comparación con la inclusión de FSK (aunque las especificaciones de Lora se centran en chirp spread spectrum) enfatiza que la energía por paquete no es mucho más eficiente debido a la corriente TX significativamente más baja y una corriente TX más baja.

CAPÍTULO IV

4. Análisis y resultados del entorno de pruebas LoRaWAN

4.1. Evaluación de desempeño de red en el escenario de monitoreo IoT

Se desarrollan tres escenarios experimentales en un entorno controlado, que modela varias condiciones de reproducción física, el propósito de estas pruebas es analizar cómo factores como la línea visual, la presencia de obstáculos y la distancia afecta los parámetros técnicos como RSSI, SNR, tasa de entrega de paquetes y estabilidad del enlace.

Las pruebas se llevan a cabo utilizando dos centros Heltec Lora 32 V3 registrados en la red (TTN) utilizando el mecanismo de activación de OTAA (activación sin aire), es decir que los nodos reciben dinámicamente el proceso sindical (JoinAccept), los parámetros operativos de la red, incluida la lista de frecuencias autorizadas y el uso de múltiples canales de transmisión como se especifica en la arquitectura de LoRaWan.

Los nodos utilizados son:

- **Un nodo de monitoreo ambiental:** Se encarga de transmitir datos simulados de temperatura y humedad.
- **Un nodo de seguridad:** que transmite variables de presencia, distancia y corriente.

Ambos nodos transmiten tramas tipo Confirmed Up a intervalos constantes, utilizando varios niveles de SF, BW y niveles de potencia según sea el caso, además los paquetes son aceptados por un Gateway Heltec HT-M02 V2, conectado a TTN y configurado para operar en la banda ISM de 915 MHz (región US915). En la figura 31 se muestra la ubicación de los nodos y del Gateway dentro del laboratorio de Telecomunicaciones.

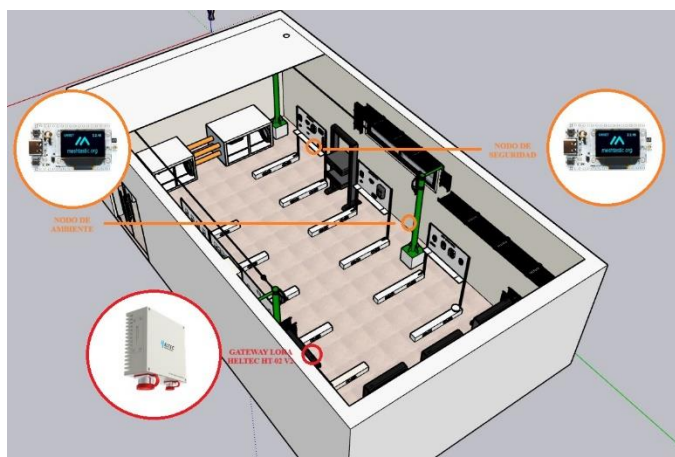


Figura 34 Ubicación de Equipos

Para realizar las pruebas se plantean tres escenarios para verificar el funcionamiento de la red LoRa

- **Escenario 1:** Enlace sin obstáculo entre el nodo y el Gateway.
- **Escenario 2:** Entorno con obstáculos que generen atenuación.
- **Escenario 3:** Áreas lejanas del Gateway con presencia de obstáculo.

La finalidad de realizar las pruebas en estos tres escenarios es verificar como varia cada parámetro en cuanto a cada condición establecida, conocer cómo influyen en la red LoRaWAN y si es confiable aplicarla en monitoreo con tecnología IoT.

4.1.1. Resultados en el escenario 1: Enlace sin obstáculo entre el nodo y el Gateway.

El primer escenario evaluado corresponde al entorno con una visión general directa entre los nodos y la puerta de enlace Lorawan Heltc HT-M02 V2 sin obstáculos físicos o fuentes cercanas de interferencias electromagnéticas.

Condiciones de prueba

Ubicación: Interior del laboratorio, nodo colocado en campo abierto sin estructuras metálicas ni paredes aproximadamente 5 a 8 metros entre emisor y gateway.

Configuración de los nodos (Misma configuración para todos los escenarios):

- Spreading Factor (SF): SF7
- Bandwidth (BW): 125 kHz
- Potencia de transmisión: 20 dBm
- Tipo de transmisión: Confirmed Up
- Activación: OTAA, operando en modo multicanal dinámico (frecuencias entre 902.3 y 903.7 MHz).

En la tabla 14 se muestran los resultados de cada uno de los parámetros que se obtuvo del escenario 1:

Tabla 14. Resultados en el escenario 1: Línea de vista directa.

Métrica	Valor mínimo	Valor máximo	Media estimada
RSSI	-59 dBm	-33 dBm	-41.2 dBm
SNR	9.5 dB	14.2 dB	13.38 dB
Frecuencias	902.3 a 903.7 MHz	–	Asignadas por TTN (OTAA)
CRC	100% OK	–	Sin errores detectados
Retransmisiones	0	–	Ninguna observada

Descripción de los resultados obtenidos

- ✓ Los paquetes transmitidos son receptados de manera correcta, esto significa que cada uno de ellos fueron verificados con el mensaje de CRC_OK.
- ✓ El resultado muestra que no existen repeticiones, es decir que la plataforma TTN reconoce los mensajes Confirmed Up, confirmando que no se presenta errores en los contadores de tramas.
- ✓ En cuanto al resultado del parámetro RSSI está por encima de los -45 dBm, lo que indica que en la capa física de comunicación la señal es aceptable.
- ✓ Por otro lado, el rango del valor de SNR se mantienen en 13.2 dB y 14.2 dB, en otras palabras, el canal no presenta ruido en el trayecto brindando una excelente transmisión.

4.1.2. Resultados en el Escenario 2: Interiores con Atenuación Moderada Entorno con obstáculos que generen atenuación.

En esta prueba se agregan obstáculos en el entorno para comprender el comportamiento de la red LoRaWAN en comparación con el primer escenario que está libre de atenuación.

Condiciones de prueba

Ubicación: Exterior del laboratorio con paredes medianeras y separación física entre nodos y gateway a unos 15 metros.

La tabla 15 muestra los resultados de cada parámetro obtenido en el escenario 2:

Tabla 15. Resultados en el escenario 2: Interiores con Atenuación Moderada

Métrica	Valor mínimo	Valor máximo	Media estimada
RSSI	- 65dBm	- 50 dBm	- 57.1 dBm
SNR	10.2 dB	14.2 dB	13.1 dB
Frecuencias	902.3 a 903.7 MHz	–	Asignadas por TTN (OTAA)
CRC	100% OK	–	Sin errores detectados
Retransmisiones	0	–	Ninguna observada

Descripción de los resultados obtenidos.

- ✓ En el resultado del parámetro RSSI se tiene un valor mínimo de -65 dBm y su valor máximo es de -50 dBm, dando como un valor promedio de -57 dBm, comparando con el resultado del escenario anterior este presenta una señal débil y se da por la atenuación que causan los obstáculos, aunque igual es aceptable porque se encuentra dentro del rango para el funcionamiento de la red LoRa.
- ✓ El valor mínimo de SNR es de 10.2 dB mientras en el máximo es de 14.2 dB, dando como promedio 13.1 dB, este resultado comparado con el anterior no varía mucho por lo que sigue siendo un valor alto, es decir que a pesar de la atenuación presente en el escenario este es bajo indicando que la señal es buena.
- ✓ En cuanto al resultado de integridad de los paquetes no se presentan errores y es 100% receptados, tampoco se muestran repeticiones de valores de CNT, es decir que el ACK no detecto interferencias.
- ✓ En este escenario la cobertura sigue siendo estable, además las tramas cambian entre el nodo de ambiente y seguridad, esto de acuerdo al canal que le asigne la plataforma TTN.

4.1.3. Resultados en el escenario 3: Áreas lejanas del gateway con presencia de obstáculo.

Este escenario es diseñado para analizar la estructura de la red de LoRaWAN en condiciones adversas de propagación, especialmente en áreas lejos del gateway y con varios obstáculos físicos como paredes de concreto, puertas metálicas y estructuras que causan pérdidas importantes debido al debilitamiento, la reflexión y la absorción, a diferencia de los

escenarios anteriores, en este solo se usa un nodo Heltec Lora V3, este nodo fue configurado por OTAA, que trabaja en los escenarios anteriores con los mismos parámetros técnicos.

Condiciones de prueba

Ubicación: Piso distinto y sala adyacente al gateway, separado por cuatro paredes de concreto y mayor distancia física (estimada en 20 a 25 metros).

La tabla 16 detalla los resultados de cada parámetro obtenido en el escenario 3:

Tabla 16. Resultados en el escenario 3: Zonas alejadas y con obstrucciones

Métrica	Valor mínimo	Valor máximo	Media estimada
RSSI	- 86 dBm	- 81 dBm	- 83.9 dBm
SNR	10.2 dB	13.8 dB	12.5 dB
CRC	100% OK	–	Sin errores detectados
Retransmisiones	0	–	Ninguna observada

Descripción de los resultados obtenidos

- ✓ En este escenario al presentar obstáculos y realizar pruebas a una distancia mayor que los escenarios anteriores, cambia el valor de RSSI dando como resultado -84 dBm lo que significa que la señal es muy débil, por lo que las condiciones de este entorno si afecta significativamente el funcionamiento de la red.
- ✓ El resultado promedio del parámetro SNR es de 12.5 dB, indicando que aún es permitido que los paquetes puedan ser decodificados correctamente.
- ✓ A pesar de los resultados de los otros parámetros la integridad de los paquetes no presenta errores en la recepción de los mismos

4.2. Análisis del impacto de parámetros de transmisión en la red LoRa

Los parámetros de transmisión en las redes LoRa, como el Spreading Factor (SF), el ancho de banda (BW) y la potencia de transmisión, afectan directamente el enlace, la cobertura, el consumo de energía y la probabilidad de colisiones, en este apartado se analiza cómo la variación controlada de estos parámetros afecta el rendimiento de la red en el entorno experimental.

4.2.1. Comportamiento del enlace según SF, potencia y ancho de banda

Se llevan a cabo pruebas específicas modificando uno o más de los siguientes parámetros en nodos Heltec LoRa 32 V3:

- Spreading Factor (SF): SF7, SF9, SF12
- Bandwidth (BW): 125 kHz y 250 kHz
- Potencia de Transmisión: 17 dBm y 20 dBm

Cada configuración fue probada bajo condiciones similares de ubicación y tráfico, con el fin de observar diferencias en RSSI, SNR, estabilidad del enlace y tiempo de aire. A continuación, se resumen las principales observaciones por tipo de parámetro.

4.2.1.1. Spreading Factor (SF)

Como se aprecia en la tabla 17, a medida que aumenta el SF, se mejora la sensibilidad del receptor (mayor alcance), pero el tiempo aumenta en el aire, lo que aumenta el riesgo de colisiones y el consumo de energía en el nodo, en las pruebas realizadas se obtiene que el SF7 es suficiente en los tres escenarios, aunque el uso de SF9 o SF12 se recomienda en áreas remotas si aumenta el tráfico o el aumento de la interrupción.

Tabla 17. Resultados de Spreading Factor (SF)

SF usado	Efecto observado	Resultados
SF7	Tiempo de aire corto, baja robustez	Ideal para enlaces cercanos, RSSI > - 60 dBm, menor consumo
SF9	Mayor tolerancia a ruido, tiempo de aire mayor	Mejora recepción en interiores con atenuación moderada
SF12	Alta sensibilidad, tiempo de aire muy alto	Adecuado solo en zonas alejadas, riesgo de congestión si mal usado

4.2.1.1.1. Ancho de Banda (BW)

El ancho de banda afecta la tasa de transferencia directa: mayor BW, mayor transporte, pero menos sensibilidad, las pruebas utilizan BW a 125 kHz, lo que alcanza el equilibrio perfecto entre el recubrimiento y la durabilidad, especialmente con SF7. En la tabla 18 se detalla lo siguiente:

Tabla 18. Resultados de Bandwidth (BW)

BW usado	Efecto observado	Resultados
125 kHz	Estándar en LoRaWAN, buena relación cobertura/capacidad	Usado en todas las pruebas con buenos resultados
250 kHz	Mayor tasa de datos, menor sensibilidad	Aún no probado en ambientes críticos, útil para aplicaciones de alta frecuencia de datos

4.2.1.2. Potencia de Transmisión (TX)

Aunque 20 dBm garantiza un buen recubrimiento, su uso permanente puede reducir la duración de la batería en los dispositivos IoT, mientras que 17 dBm muestran una ligera pérdida de RSSI como se detalla en la tabla 19, aunque mantuvo la confiabilidad de la conexión en áreas internas.

Tabla 19. Resultados Potencia de Transmisión (TX)

Potencia	Efecto observado	Resultados
20 dBm	Potencia máxima legal, excelente RSSI	Utilizada en la mayoría de pruebas, ideal para pruebas de cobertura
17 dBm	Reducción de consumo energético, leve pérdida de alcance	Adecuada para nodos cercanos o en red densa

4.3. Análisis de calidad de señal y cobertura

La calidad de la señal en LoRaWAN se evalúa utilizando dos métricas principales: RSSI (Received Signal Strength Indicator) y el SNR (Signal-to-Noise Ratio), estas métricas son importantes para evaluar la propagación de la señal y la calidad del enlace en función de la intensidad y el equilibrio entre señal e interferencias.

4.3.1. RSSI y SNR en función de la ubicación y evaluación de cobertura

Recopilando datos de RSSI y SNR para tres escenarios definidos en distintos lugares del laboratorio, a continuación, en la tabla 20, se muestran los valores medios de cada escenario, que muestran el cambio en la posición relativa de los nodos y Gateway:

Tabla 20. RSSI y SNR en Función de la Ubicación y evaluación de cobertura

Escenario	Distancia estimada	Obstáculos	RSSI promedio	SNR promedio
Línea de vista directa	5 - 20 m	Ninguno	-41.9 dBm	14.1 dB
Interiores con atenuación moderada	20 – 50 m	1 - 2 paredes	-57.1 dBm	13.1 dB
Zonas alejadas y con obstáculos	50 – 100 m	Múltiples paredes	-83.9 dBm	12.5 dB

Resultados obtenidos

- A medida que nos alejábamos, la señal se debilitaba gradualmente, lo cual era de esperar debido a cómo se dispersa y absorbe en el entorno.
- Además, el SNR también disminuyó de forma constante, sugiriendo que la interferencia en el canal era baja dentro de la banda ISM.
- Durante la tercera prueba, el RSSI llegó a alrededor de -85 dBm, que es el nivel más bajo para que LoRa funcione de manera estable.
- En la figura 31 muestra la relación de cada uno de los escenarios con los valores obtenidos en las pruebas.

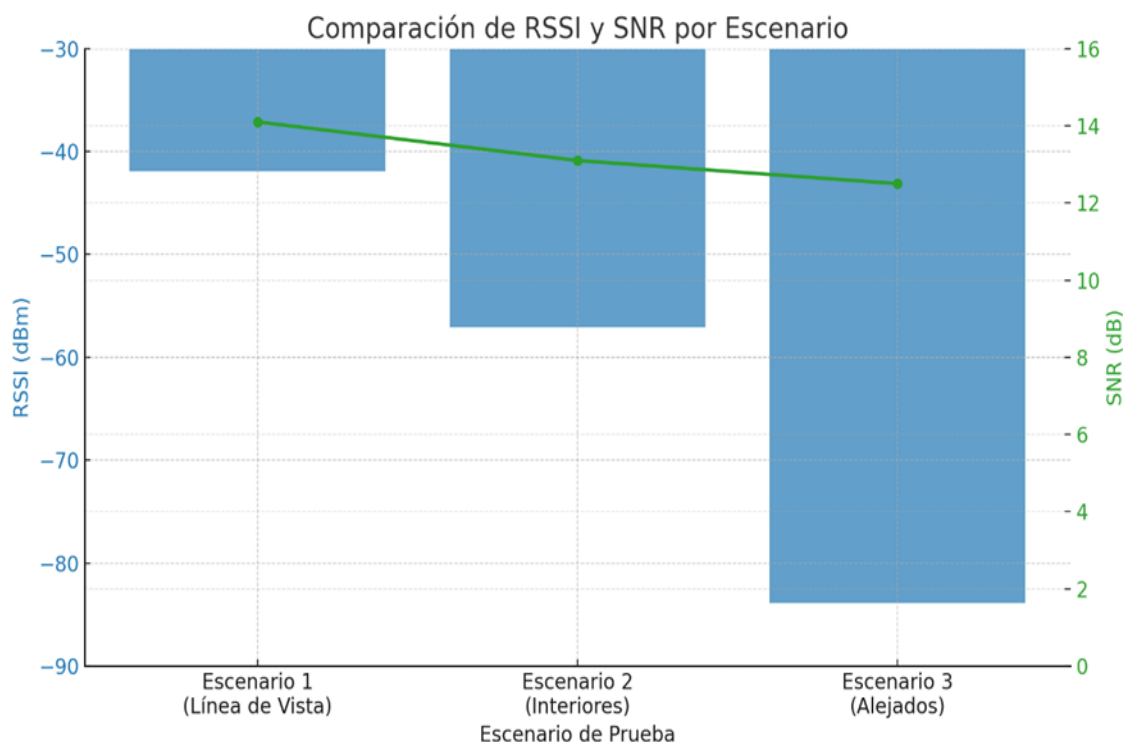


Figura 35. Comparación de calidad de señal por tipo de entorno

En esta figura se observa la comparación de los parámetros RSSI y SNR en los tres escenarios que se realizan las pruebas antes presentadas, a pesar de la adaptación de cada escenario la red LoRaWAN se mantiene estable, transmitiendo los paquetes con una señal adecuada aun con la presencia de atenuaciones en el caso del escenario 2 y 3, el dispositivo Heltec HT-M02 V2 cubre distancia desde 20 a 50 metros configurando de manera correcta el equipo, aunque si se desea cubrir otras áreas se debe de ajustar el parámetro Spreading Factor, otro método es aumentar la densidad del gateway ambas configuraciones permiten obtener una transmisión fiable.

4.4. Resiliencia ante interferencias y ruido

Uno de los objetivos durante el desarrollo de una red LoRaWAN es mantener una comunicación confiable a pesar de severas interferencias. Esto se realiza con la modulación LoRa (CSS: Chirp Spread Spectrum) y el uso de Spreading Factors que incrementan la robustez en la capa física donde el SNR es negativo. En entornos con muchos dispositivos, las interferencias y la sobrecarga de la red pueden disminuir su rendimiento. Para evaluar su resistencia, se llevaron a cabo pruebas usando la TTGO T3 V1. 6. El esquema implementado enviaba información de manera continua, manteniendo la misma rapidez y configuración SF que los nodos Heltec.

4.4.1. Efecto de nodo interferente (TTGO T3 V1.6.1) sobre la Red LoRa

- Se configura el nodo TTGO para que mandara constantemente secuencias de datos vacías a 902.3 MHz, utilizando SF7, BW125 y sin confirmaciones (Unconfirmed Up).
- Al mismo tiempo, los nodos Heltec funcionaron con OTAA, SF7 y Confirmed Up, usando la misma frecuencia que TTN había dado a TTGO.
- Se realiza un seguimiento de los paquetes que llegaban al gateway, junto con los valores de RSSI y SNR, posibles reenvíos (CNT repetido) y cambios en la calidad de la conexión.

Resultados obtenidos

- Los nodos Heltec a pesar de la presencia de interferencias estos cumplieron con enviar datos sin errores, en este caso si presenta un cambio de valores de RSSI en las pruebas, pero se mantuvo una transmisión estable.
- Al no tener errores en la recepción de paquete se puede concluir que todos los paquetes en cada escenario fueron integrados adecuadamente, pero si existe una variación de valores de SNR indicando que se presentan ruido en el entorno o se presentan otras señales de equipos externos.
- El contador se duplica en diversos instantes, es decir que existe la posibilidad de que las interferencias impactaron la ventana RX1, en caso de la presencia de este problema es recomendable corregir mediante la ausencia de ACKs,

Una vez analizada esta parte, la red LoRaWan funciona de manera correcta aun con los nodos integrados, pero a la vez esto afecta en términos de recepción de ACK, también hará que la frecuencia del SNR sea menor, es decir que este propensa a retransmisiones, de todas maneras la red LoRa si permite el envío de paquetes simultáneamente pero empleando varios Spreading Factors, ya que si un dispositivo usa el mismo SF va a ocasionar una colisión porque también estará utilizando la misma frecuencia y operando en el mismo canal.

4.4.2. Estrategias para mitigación de interferencias

El comportamiento de la red tras el análisis de las interferencias presentadas detalla que el rendimiento, a pesar de la excelente resistencia al ruido de la modulación de Lora, se degrada significativamente si varios dispositivos usan el mismo canal, especialmente si estos dispositivos tienen la misma frecuencia y SF, de acuerdo a lo planteado se integran estrategias que permiten que la transmisión sea fiable.

1. Utilizar diferentes Spreading Factors:

Los dispositivos LoRa cuentan con la característica de admitir varias transmisiones simultáneas del mismo canal físico, pero solo si el SF es diferente.

2. Canales distintos:

La plataforma TTN emplea el método de salto de canales y este va de 8 en 8, este método permite que se disminuya la presencia de colisiones.

3. Optimizar tu gateway:

Para optimizar el Gateway se recomienda ubicarlo en una parte alta y central tanto como sea posible, Esta posición generalmente va a mejorar su alcance y reduce el uso de SF altos.

4. Ajustar tus transmisiones de manera adecuada:

Es necesario evitar el uso de SF12 o SF11 cerca de los nodos, esto ocasiona la saturación de los canales ocasionando daños en su funcionamiento

5. Ajuste Automático el ADR:

Esta característica permite a la red factores disipados de manera flexible y el efecto de emisión para la resistencia de la señal por lo tanto va a mejorar su rendimiento.

4.5. Evaluación del consumo energético

Se recomienda minimizar el consumo energético en este tipo de proyectos porque muchos de los nodos funcionan con baterías, de esta manera el sistema IoT extenderá su vida útil, por esta razón los parámetros ya analizados permiten también estimar la duración de batería.

4.5.1. Consumo según Spreading Factor, Potencia y Frecuencia de Envío

Se llevan a cabo experimentos modificando los Spreading Factors (SF7, SF9 y SF12) con un ancho de banda constante de 125 kHz, con el fin de estudiar cómo el tiempo de emisión influye en el uso de energía, además se compararon las potencias de transmisión de 20 dBm y 17 dBm, investigando su impacto en la intensidad de la señal y el consumo energético, con un intervalo fijo de 30 segundos entre cada transmisión, se evidencia en la tabla 21, que estas selecciones influyen directamente en la vida útil de la batería y en el funcionamiento del nodo.

Tabla 21. Consumo según Spreading Factor, Potencia y Frecuencia de Envío

Spreading Factor	Time On Air aprox. (payload 15 bytes)	Consumo relativo	Resultados
SF7	56 ms	Bajo	Aplicado en áreas pequeñas.
SF9	246 ms	Medio	Variación entre alcance y consumo
SF12	1483 ms	Alto	Abarca a distancias largas, pero a la vez consume más energía

Cada vez que se usan valores elevados de SF, la transmisión se alarga también y está también consumirá más energía, es decir la batería no va a durar mucho tiempo comparando con otros SF.

4.5.1.1. Influencia de la frecuencia de envío

- Estando idle o deep sleep casi todo el tiempo, el nodo transmite datos cada 30 segundos.
- Enviarlos con menos frecuencia, reduce bastante el gasto energético diario.
- Por poner un caso, si en vez de transmitir cada 30 segundos se programa una transmisión cada 10 minutos, una batería de 1200 mAh puede durar más de 6 meses en lugar de solo 1 mes.

4.5.2. Estrategias de Ahorro energético y vida útil de los dispositivos

Al diseñar dispositivos IoT con LoRa, es crucial priorizar la duración de la batería sin comprometer la conectividad ni la precisión de los datos. Los experimentos realizados revelaron métodos importantes para disminuir el consumo y alargar notablemente la vida útil de los nodos, en la tabla 22 se detalla lo siguiente:

Tabla 22. Tabla comparativa de estrategias de ahorro energético

Estrategia	Objetivo	Impacto en el Consumo	Observaciones Técnicas
Uso de SF óptimo (ADR)	Reducir tiempo de transmisión	Alto	Preferir SF7 si el enlace lo permite; usar ADR con OTAA

Envío de datos espaciado	Minimizar número de transmisiones	Muy alto	Usar intervalos ≥ 10 min para variables lentas
Deep Sleep entre tramas	Ahorrar durante inactividad	Muy alto	Activar solo el RTC; útil en nodos estacionarios
Potencia de transmisión ajustada	Disminuir el consumo instantáneo	Medio	Reducir a 17 dBm en zonas de buena cobertura
Monitor de batería	Supervisar autonomía	Indirecto	Enviar datos a Ubidots para alertas
Evitar Confirmed Up innecesarios	Prevenir retransmisiones costosas	Alto	Úsalo solo cuando el ACK sea esencial

Para disminuir el gasto de energía en las redes LoRaWAN, resulta fundamental prestar atención tanto a los componentes materiales como a la forma en que se ajustan y se programan. Usar Spreading Factors reducidos, ajustar la potencia de emisión, activar modos de reposo que ahorren batería y no enviar datos demasiado seguido, ayuda a que los aparatos sigan funcionando por muchos meses, inclusive años.

4.6. Análisis de datos y visualización en plataforma TTN + Ubidots

Un componente necesario de cualquier sistema IoT es la habilidad para recolectar, enviar, guardar y visualizar datos de manera eficaz, se configuran los nodos Heltec LoRa 32 V3 para transmitir información a través de LoRaWAN, empleando The Things Network (TTN) como red de transporte y Ubidots como plataforma de visualización y análisis.

Los dos nodos (seguridad y ambiente) se vinculan a TTN a través de la activación OTAA, y su integración con Ubidots se lleva a cabo a través de Webhooks HTTP personalizados, facilitando la recepción y el procesamiento automático de los datos decodificados desde el paquete LoRa.

4.6.1. Escenario ambiente

Se configura el nodo de monitoreo ambiental para enviar variables simuladas de temperatura y humedad a intervalos constantes, cada paquete contiene un payload con dos

datos codificados en formato hexadecimal, que posteriormente eran decodificados por TTN a través de un Payload Decoder personalizado en JavaScript como lo muestra la figura 33.

Mtype	Time	Freq	Rssi	SNR	CRC	Mode	CodeRate	DataRate	CNT
Unconfirmed Down	14:41:32	923.9			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	9 DevAddr: 260C3DCA
Confirmed Up	14:41:32	902.5	-44	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	9 DevAddr: 260C3DCA FPort: 2 Payload: 02 69 49 77 C5
Unconfirmed Down	14:40:32	927.5			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	8 DevAddr: 260C3DCA
Confirmed Up	14:40:32	903.7	-41	12.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	8 DevAddr: 260C3DCA FPort: 2 Payload: 02 C7 86 3F 9E
Unconfirmed Down	14:39:43	926.9			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	7 DevAddr: 260C3DCA
Confirmed Up	14:39:43	903.5	-44	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	7 DevAddr: 260C3DCA FPort: 2 Payload: 02 E3 30 A1 10
Unconfirmed Down	14:39:04	925.1			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	6 DevAddr: 260C3DCA
Confirmed Up	14:39:04	902.9	-40	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	6 DevAddr: 260C3DCA FPort: 2 Payload: 02 ED DD F0 A6
Unconfirmed Down	14:38:04	926.3			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	5 DevAddr: 260C3DCA
Confirmed Up	14:38:04	903.3	-41	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	5 DevAddr: 260C3DCA FPort: 2 Payload: 02 88 44 25 78
Unconfirmed Down	14:36:34	923.9			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	4 DevAddr: 260C3DCA
Confirmed Up	14:36:33	902.5	-33	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	4 DevAddr: 260C3DCA FPort: 2 Payload: 02 8E 26 A5 84
Unconfirmed Down	14:35:34	925.1			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	3 DevAddr: 260C3DCA
Confirmed Up	14:35:33	902.9	-32	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	3 DevAddr: 260C3DCA FPort: 2 Payload: 02 46 6C BE B7

Figura 36. Captura de paquetes desde Gateway Lora Heltec m02 v2

En la figura 32 se muestra como llegan los paquetes del nodo de ambiente al Gateway

```

14:39:31 Store upstream data message DevAddr: 26 0C 3D CA
14:39:31 Forward data message to App. DevAddr: 26 0C 3D CA E3 30 A1 10 69 FPort: 2 Data rate: SF7BW125 SNR: 14 RSSI: -44
14:39:31 Forward uplink data message DevAddr: 26 0C 3D CA Payload: { humedad: 58.3, temperatura: 25.98 } 01 0A 26 02 47 FPort: 2 Data rate: SF7BW125 SNR: 14
14:39:31 Receive uplink data message DevAddr: 26 0C 3D CA
14:39:31 Successfully processed data... DevAddr: 26 0C 3D CA
14:39:31 Link ADR accept received DevAddr: 26 0C 3D CA
14:39:30 Receive data message DevAddr: 26 0C 3D CA
14:38:32 Downlink successfully trans... DevAddr: 26 0C 3D CA Rx1 Delay: 5
14:38:32 Link ADR request enqueued DevAddr: 26 0C 3D CA
14:38:32 Successfully scheduled data... DevAddr: 26 0C 3D CA
14:38:32 Schedule data downlink for _ DevAddr: 26 0C 3D CA Rx1 Delay: 5

```

Figura 37. Captura de paquetes desde TTN

4.6.1.1. Conexión con UBIDOTS

- En Ubidots, se crearon dos variables virtuales: Temperatura y Humedad. Ver figura 34.
- Se emplearon widgets tipo gráfico de líneas para observar el comportamiento de las variables en tiempo real. Ver figura 35.

6 Variables

⚙️ ☰







<input type="checkbox"/>	Value	Name	Last updated ↓	
<input type="checkbox"/>	 13.2	snr-heltec-upse	a minute ago	⋮
<input type="checkbox"/>	 25.93	temperatura	a minute ago	⋮
<input type="checkbox"/>	 -44	rssi-heltec-upse	a minute ago	⋮
<input type="checkbox"/>	 58	humedad	a minute ago	⋮
<input type="checkbox"/>	 2	F Port	a minute ago	⋮
<input type="checkbox"/>	 10	Frame counter	a minute ago	⋮

Figura 38. Conexión con UBIDOTS- ambiente

4.6.1.2. Dashboard de UBIDOTS

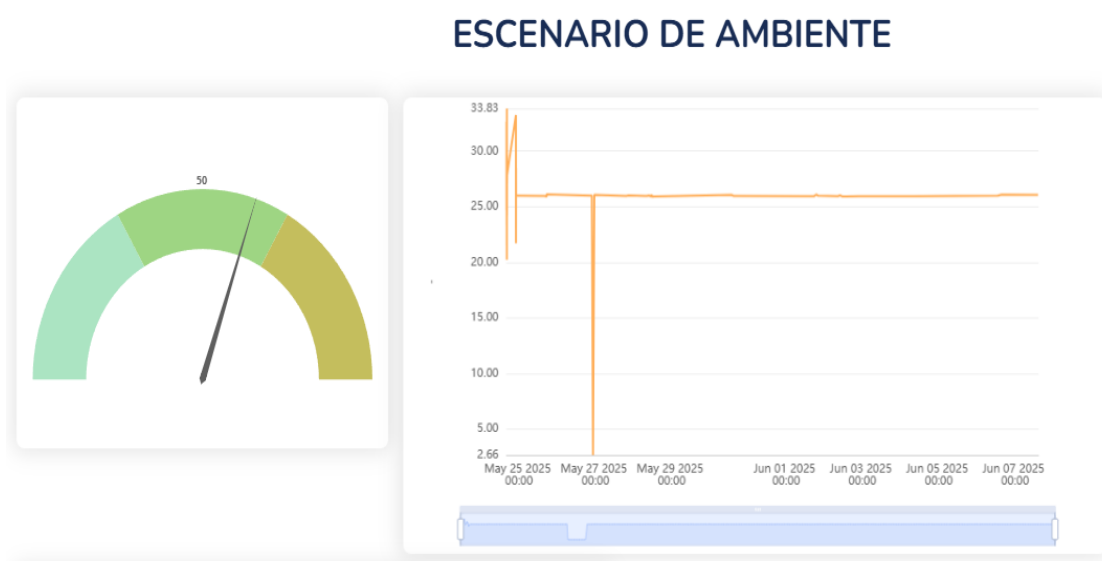


Figura 39. Dashboard de UBIDOTS - ambiente

4.6.1.3. Resultados

- Los valores transmitidos fueron constantes y presentaron variaciones ligeras, tal como se había previsto para replicar un ambiente de laboratorio.
- La integración TTN a Ubidots no registró pérdidas de datos.
- En promedio, el periodo de latencia desde la transmisión LoRa hasta la visualización en la nube fue inferior a 3 segundos.

4.6.2. Escenario seguridad

En este escenario se evalúa el comportamiento de un nodo Heltec LoRa 32 V3 orientado a aplicaciones de seguridad IoT, el cual fue programado para simular la lectura de tres variables clave: presencia mediante sensor PIR, corriente eléctrica y distancia ultrasónica. Estas variables fueron codificadas en el payload LoRa y enviadas periódicamente a la red TTN mediante el protocolo LoRaWAN con activación OTAA. Ver figura 37 de como llegan los paquetes a la interfaz del Gateway y ver figura 38 de como llegan a TTN.

MType	Time	Freq	Rssi	SNR	CRC	Mode	CodeRate	DataRate	CNT
Unconfirmed Down	15:01:17	923.3			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	5
Confirmed Up	15:01:16	903.5	-28	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	4
Unconfirmed Down	15:00:15	926.9			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	4
Confirmed Up	15:00:15	903.5	-28	14.2	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	4
Unconfirmed Down	14:59:15	927.5			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	3
Confirmed Up	14:59:14	903.1	-32	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	2
Unconfirmed Down	14:58:14	925.7			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	2
Confirmed Up	14:58:13	903.3	-34	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Unconfirmed Down	14:57:12	926.3			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	1
Confirmed Up	14:57:12	903.3	-34	13.5	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	1
Unconfirmed Down	14:56:53	923.3			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	0
Confirmed Up	14:56:53	902.3	-40	14	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	0
Unconfirmed Down	14:56:04	923.9			NO_CRC	LORA	4/5	SF7BW500	0
Join Request	14:56:04	902.5	-39	13.8	CRC_OK	LORA	4/5	SF7BW125	AppEUI: 14 AC FCA3 15 17 49 03 DevEUI: 70 B3 D5 7E D0 07 0F A

Figura 40. Captura de paquetes desde Gateway Lora Heltec m02 v2- seguridad

```
Forward uplink data message DevAddr: 26 0C 21 2A Payload: { corriente_A: 0.52, distancia_cm: 128, presencia: true } 02 01 80 00 34 FPort: 2 Data rate: SF7BW125
Successfully processed data... DevAddr: 26 0C 21 2A
Schedule data downlink for ... DevAddr: 26 0C 21 2A </> Rx1 Delay: 5
```

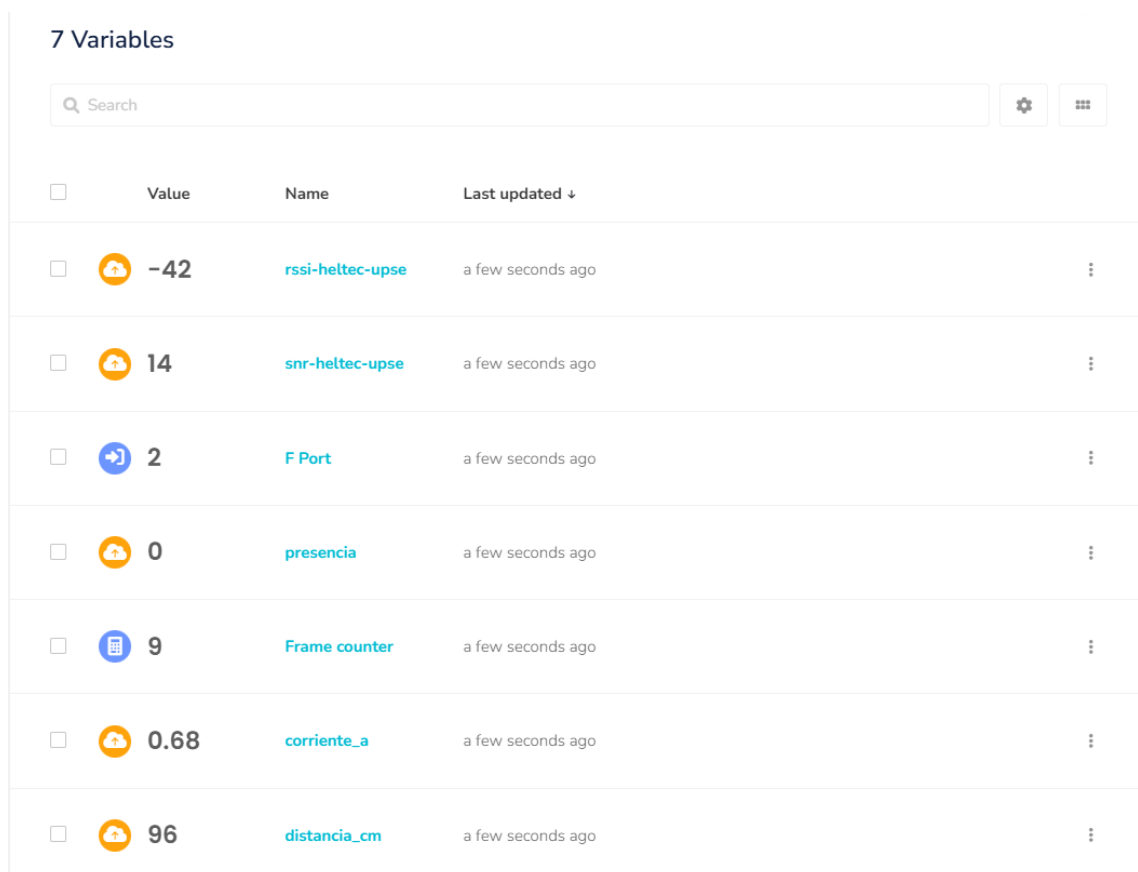
Figura 41. Captura de paquetes desde TTN- seguridad.

4.6.2.1. Conexión con UBIDOTS

Cada paquete transmitido contenía tres valores codificados en formato hexadecimal, identificables mediante un DevAddr único. El payload era interpretado mediante un decoder personalizado en TTN, el cual separaba cada byte según el orden establecido:

- Byte 1–2: Corriente simulada (mA)
- Byte 3–4: Distancia medida (cm)
- Byte 5: Presencia (0 = no, 1 = sí)

Una vez decodificados, los datos fueron reenviados a Ubidots mediante un Webhook HTTP, generando variables independientes. Al igual que el nodo de ambiente, se realizaron las mismas configuraciones a excepción que para este nodo contiene tres valores como se observa en la figura 38, mientras que los valores se visualizaban similar al primer nodo como en la figura 39.



The screenshot shows a Ubidots dashboard with a search bar and a table of 7 variables. Each variable has a checkbox, a value, a name, and a last updated timestamp. The variables are: rssi-heltec-upse (-42), snr-heltec-upse (14), F Port (2), presencia (0), Frame counter (9), corriente_a (0.68), and distancia_cm (96).

<input type="checkbox"/>	Value	Name	Last updated ↓
<input type="checkbox"/>	-42	rssi-heltec-upse	a few seconds ago
<input type="checkbox"/>	14	snr-heltec-upse	a few seconds ago
<input type="checkbox"/>	2	F Port	a few seconds ago
<input type="checkbox"/>	0	presencia	a few seconds ago
<input type="checkbox"/>	9	Frame counter	a few seconds ago
<input type="checkbox"/>	0.68	corriente_a	a few seconds ago
<input type="checkbox"/>	96	distancia_cm	a few seconds ago

Figura 42. Conexión con UBIDOTS - seguridad.

4.6.2.2. Dashboard de UBIDOTS



Figura 43. Dashboard de UBIDOTS- Seguridad.

4.6.2.3. Resultados

- El nodo responde correctamente a los intervalos de transmisión configurados, enviando tramas cada 60 segundos con confirmación (Confirmed Up).
- Se registran los datos sin pérdidas, con valores CRC_OK constantes y sin repeticiones de CNT, lo que indica ausencia de retransmisiones y buena cobertura.
- En la mayoría de las situaciones, el intervalo entre la transmisión y la actualización en Ubidots fue menor a 5 segundos.
- La variabilidad de los datos superó a la del escenario ambiente, a causa del carácter simulado de sucesos de seguridad, tales como cambios bruscos en la distancia o la activación del sensor de presencia.

4.7. Manual de uso del Gateway LoRaWAN Heltec HT-M02 V2

Este segmento explica el uso, configuración y las prácticas del gateway Heltec HT-M02 V2, que es un elemento importante en la arquitectura del ambiente de pruebas desarrollado, funcionando como enlace entre los nodos LoRa y la red pública TTN (The Things Network), su funcionamiento adecuado asegura la acogida, retransmisión y seguimiento de los paquetes LoRaWAN enviados por los dispositivos de vigilancia.

4.7.1. Descripción técnica del dispositivo

Heltec HT-M02 V2 es un gateway, compacto y simple de instalar para proyectos IoT en redes públicas de la red Things (TTN) y configuraciones privadas. Viene con el dispositivo Semtech SX1301, capaz de recoger múltiples frecuencias de Lora a la vez. En la tabla 23 se describe cada parámetro de este equipo.

Tabla 23. Características Técnicas del Gateway Heltec HT-M02 V2

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Frecuencia de operación	915 MHz (configurado para la región de América)
Modulación	LoRa (soporta múltiples Spreading Factors simultáneamente)
Conectividad	Ethernet (RJ45) y WiFi (modo AP o cliente)
Configuración	Vía interfaz web (Web UI), accesible desde IP local
Alimentación	Entrada USB-C, 12V, mínimo 3A
Compatibilidad	TTN, ChirpStack y servidores personalizados (LoRa Packet Forwarder – Semtech UDP)

4.7.2. Instrucciones de configuración y uso

4.7.2.1. Preparación inicial

- Conexión de la antena:

Para conectar las antenas, tanto de WiFi y LoRa, se debe atornillar firmemente al puerto indicado en el Gateway. Como recomendación es preferible conectar las antenas antes de encender el equipo con el fin de evitar daños al módulo RF.

- Fuente de Alimentación:

Una vez que se localice una fuente de alimentación confiable, se conecta el cable USB-C al equipo.

- Conexión de Red:

Para conectar el equipo a la red utilizaremos la conexión mediante WiFi, pero para una mayor conectividad el cable Ethernet irá conectado directamente al Router TP Link con acceso a Internet, tal como se ilustra en la imagen de referencia.

4.7.2.2. Acceso a la interfaz web

- Al tener conectado la antena al equipo emitirá una señal Wifi que debe salir reflejada como una red en la laptop o PC que estemos utilizando para la configuración.
- La red saldrá con el nombre de HT-M02-AP como se observa en la figura 40, como contraseña escribiremos “heltec.org”.

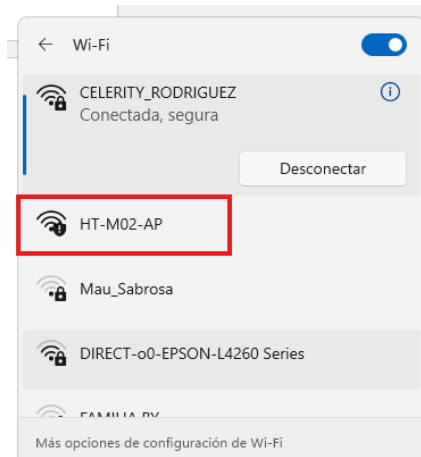
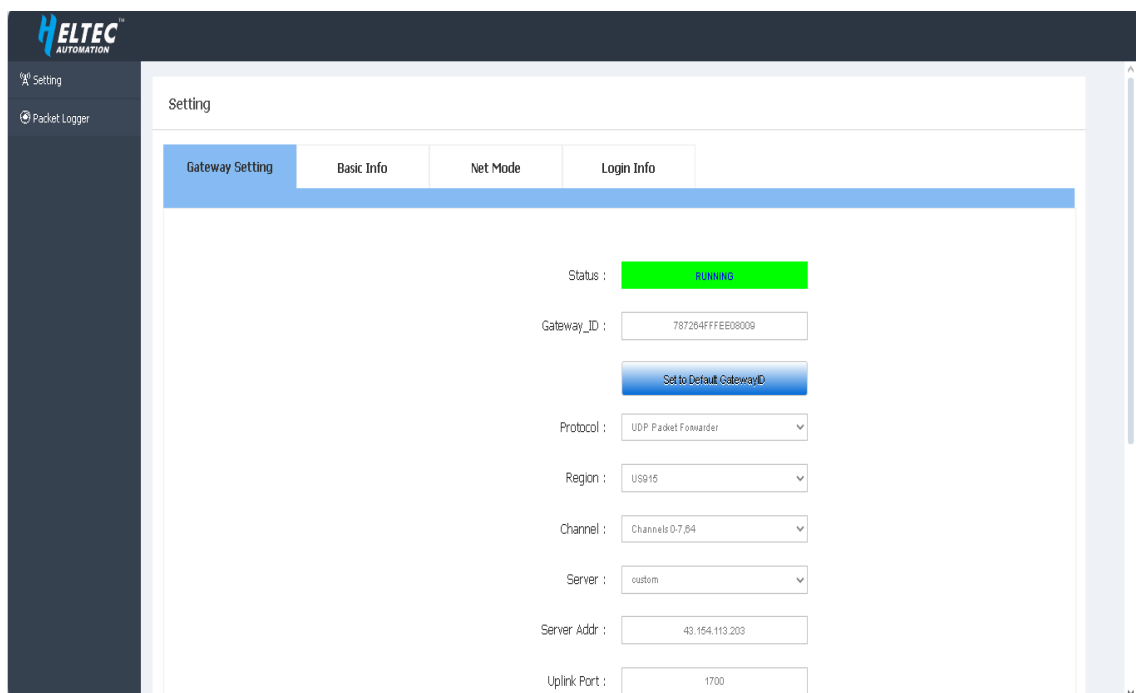


Figura 44. Red - HT-M02-AP.

- Después de conectarse a la red WIFI, en el dispositivo que se esté trabajando ingresamos la siguiente dirección IP en el navegador 192.168.4.1 y como nombre de usuario ingresamos “HT-M02” y como contraseña “heltec.org” para iniciar sesión en la página de configuración, en esta sección se tiene que confirmar que el dispositivo esté ubicado en la región adecuada, tal como lo muestra la figura 41.



4.7.2.3. Configuración de LoRaWAN y TTN

Para agregar el Gateway a TTN seguimos los siguientes pasos de manera adecuada para que no existan errores al momento de ingresar a las plataformas:

En el apartado "Packet Forwarder", configurar tal como la figura 42:

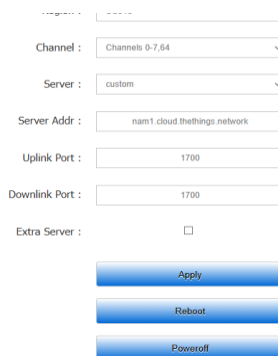
- Server Address: nam1.cloud.thethings.network
- Server Port: 1700
- Gateway ID: (disponible en la etiqueta del dispositivo o extraíble por consola)
- Guardar y reiniciar el dispositivo.



Status : Running

Gateway_ID :

Figura 45. Interfaz Web.



Channel :

Server :

Server Addr :

Uplink Port :

Downlink Port :

Extra Server :

Figura 46. Agregar Gateway a TTN.

4.7.2.4. Registro en TTN

- Creamos una cuenta en TTN con los datos que nos pide en la figura 43 e introducimos el nombre de la red y la región donde está ubicado el Gateway.

THE THINGS INDUSTRIES Account UPSE

Launch your The Things Stack Cloud

Our cloud launcher is designed to help you setting up your new network. If you are not the designated network administrator, please share [this unique URL](#) with them so that they can complete the setup process.

- Network name: Lab_Teleco_UPSE
- Network ID: labtelecoupe
- Cluster: North America 1 (California, USA)
- Admin settings**

Admin settings

Set up the administrator account on your new The Things Stack Cloud. This account is used when signing into the [Console](#) or [CLI](#). After launching your network, you will receive an email with a link to set up your password.

Full name
Jose Emilio Yagual Lainez

Email
yagualaje@gmail.com

Repeat email
yagualaje@gmail.com

Username
jose_emilioy

Figura 47. Registro en TTN.

- Dentro de la interfaz principal, vamos a la opción que dice “Connected gateways” y hacemos clic en “Add Gateway”.
- Para registrar el Gateway, introducimos el ID que aparece en la etiqueta del dispositivo o escaneamos el código QR, en la figura 44 se registra el Gateway que se utilizará.

Register gateway

Register your gateway to enable data traffic between nearby end devices and the network.

Learn more in our guide on [Adding Gateways](#).

Does your gateway have a LoRaWAN® Gateway Identification QR Code? Scan it to speed up onboarding.

Scan gateway QR code

Gateway EUI *

78 72 64 FF FE E0 80 09

Confirm

To continue, please confirm the Gateway EUI so we can determine onboarding options

Figura 48. Registrar el Gateway

- Cuando el sistema detecta el equipo, ingresamos el nombre que deseamos colocarle además del ID y la frecuencia en la que trabajará como lo detalla la figura 45.

Gateway ID ⓘ*

Gateway name ⓘ

Frequency plan ⓘ*

+ Add frequency plan

Note: most gateways use a single frequency plan. Some 16 and 64 channel gateways however allow setting multiple within the same band.

Require authenticated connection ⓘ
Choose this option eg. if your gateway is powered by [LoRa Basic Station](#)

Share gateway information
Select which information can be seen by other network participants, including [Packet Broker](#)

Share status within network ⓘ

Share location within network ⓘ

Register gateway

Figura 49. Configuración del Gateway.

- Una vez agregado los datos mencionados tendremos la siguiente interfaz en TTN del Gateway agregado correctamente como se observa en la figura 46.

The screenshot shows the TTN Gateway overview page for 'Heltec M02 v2'. The page is divided into several sections:

- General information:** Gateway ID (heltec-upsae), Gateway EUI (78 72 64 FF FE E0 88 09), Frequency plan (United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)), and Created at (Nov 25, 2024 16:27:46).
- Network settings:** A list of settings with toggle switches: Require authenticated connection (Disabled), Public status (Enabled), Public location (Enabled), Packet Broker forwarding (Enabled), Status location updates (Disabled), and Enforce duty cycle (Enabled).
- Gateway status:** Shows 30 day uptime (145.05), Roundtrip times (ms) (145.77ms), Connection stats (7 45 sec. ago, 7 (7 Ack'd) 45 sec. ago, Received 43 sec. ago, Connection started 27 minutes ago), and Duty cycle utilization (902.3 - 914.9MHz: 0.00%, 923.3 - 927.5MHz: 0.00%).

Figura 50. Interfaz en TTN del Gateway.

4.7.3. Prácticas de laboratorio para el uso del Heltec HT-M02

Durante las pruebas de laboratorio se analiza y examina la tecnología de red LoRaWAN, utilizando diversos dispositivos y plataformas para probar la transmisión de datos.

Integración del sistema

- El Heltek HT-M02 V2 Gateway puede enviar y recibir datos a través de la red LoRaWAN, que sirve como un sistema para verificar la eficacia de la información.
- Los dispositivos de evaluación y la plataforma emplean la transferencia de datos para intercambiar, cooperar y obtener la información necesaria, y se verifica la precisión de la señal de datos al identificar y analizar eventos clave como JoinRequest, JoinAccept y Data up.

Recopilación de datos técnicos.

- Se obtienen datos técnicos fundamentales como RSSI, SNR, frecuencia, tasa de código y DevAddr para determinar la calidad de la señal.
- Las pruebas se llevan a cabo en diferentes ambientes, desde aquellos sin interferencias hasta aquellos con interferencias, para analizar el desempeño del sistema en diversas condiciones.

Transmisión mediante nodos Heltec LoRa 32 V3

- Las pruebas de transmisión se efectúan con sensores de ambiente y de seguridad que están integrados en el nodo, enviando datos al TTN. Finalmente, la transmisión se muestra en tiempo real a través de la plataforma Ubidots que se integra en el webhook.

CONCLUSIONES

Al implementar el entorno de pruebas dentro del laboratorio de telecomunicaciones, se logra evaluar el rendimiento de la red LoRaWAN y las variaciones que se presentan en cada una de las pruebas realizadas, dando a conocer que este tipo de tecnología es la adecuada para sistemas IoT, siempre y cuando se necesite un bajo consumo de energía y transmisiones a grandes distancias.

Utilizando los dispositivos Heltec LoRa 32 V3 y un gateway Heltec HT-M02 V2 que estos cumplen la función de trabajar como nodos, se vinculan con las plataformas The Things Network (TTN) y Ubidots para visualizar los datos ambientales y de seguridad, creando así una red funcional.

Los parámetros analizados en cada una de las pruebas realizadas, indican que estas si interfieren en el rendimiento de la red, afectando el alcance, la calidad de señal, la tasa de entrega de paquetes y el consumo energético, en cuanto a los resultados presentados en los escenarios se opta por la configuración que presenta más estabilidad en la red con los datos de Spreading Factor de SF7, un ancho de banda de 125 KHz y una potencia de transmisión de 20 dBm.

Con las pruebas ejecutadas también se logra entender que la red LoRa puede permanecer estable aun con la presencia de obstáculos en el entorno, esto ocurre solo si se emplean las estrategias necesarias en cada configuración de los nodos, tomando en cuenta como interviene cada parámetro.

Para fortalecer el aprendizaje de los estudiantes y desarrolladores se elabora un manual donde se detalla el uso del gateway Heltec HT-M02 con el objetivo de que estos conocimientos se han aplicados en nuevas prácticas dentro de laboratorios o en sus áreas profesionales.

RECOMENDACIONES

Habilitar el ADR (velocidad de transmisión de datos adaptativos) en nodos fijos para que la red pueda ajustar automáticamente el coeficiente SPAP y el efecto de transmisión que mejora el rendimiento y reduce el consumo de energía, también se debe evitar un alto uso de SF en áreas con una buena conexión, ayuda a acortar el tiempo de transmisión y reducir el uso de batería.

Insertar los estados de bajo consumo, como el deep sleep, entre cada transmisión de datos, de acuerdo con el tipo de variable supervisada, que extiende el tiempo útil del dispositivo, además se debe planificar la red, teniendo en cuenta el canal y la distribución de SF para reducir las colisiones y prevenir la saturación del canal, especialmente en el entorno con muchos nodos.

Se recomienda instalar puertas de enlace adicionales en lugares con alta amortiguación o sin cobertura, usar repetidores o usar antenas externas con mayores beneficios para mejorar el alcance, un consejo es que se debe aprovechar el entorno de prueba como una herramienta educativa, así como prácticas técnicas diseñadas que cubren la configuración en la visualización de datos en las plataformas IoT.

Incentivar el desarrollo de nuevas aplicaciones utilizando métodos como fragmentación y compresión de datos, lo que le permite transferir cargas más útiles, se conoce que esta práctica ya se ha implementado con éxito en países como China e India y la vez puede abrir nuevas oportunidades para la red LoRa al ser usada en escenarios más exigentes.

ANEXOS

Anexo 1 Nodos Heltec LoRa 32 V3 y Gateway Heltec LoRa HT-02 V2 instalados dentro del laboratorio de telecomunicaciones.

- **Nodos Heltec LoRa 32 V3 en funcionamiento:**



Figura 51 Nodo Ambiente Funcionando



Figura 52 Nodo Seguridad Funcionando

- Gateway Heltec LoRa HT-M02 V2 conectado



Figura 53 Gateway Heltec Funcionando

BIBLIOGRAFIA

- AliExpress. (2025). Heltec ESP32 WiFi Kit 32 (V3) Placa de desarrollo. *Aliexpress.com*.
Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/1005005192172383.html>
- AliExpress, V. (2024). HT-M02 V2 Edge Computing LoRa/LoRaWAN IoT estación Base de
puerta de enlace granja Industrial inteligente Heltec SX1303 IoT IP66. *Aliexpress.com*.
Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/1005005514949316.html>
- Almeida C, D. (2025). Desarrollo de una red híbrida LORAMESH-LORAWAN para ampliar
la cobertura de la red LORAWAN. *Repositorio Institucional de la Universidad
Politécnica Salesiana*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30527>
- Angulo C, L. J., & Rivera M, K. R. (2023). *Diseño de un sistema domótico centralizado con
comunicación inalámbrica mediante el uso de sistemas embebidos, con pantalla de
operador y tecnología IoT, para el proyecto de laboratorio de domótica e Inmótica de
la FIEC*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58235>: ESPOL. FIEC.
- Arreaga B, L., & Larreátegui U, A. (2024). Optimización de Redes de Sensores Agrícolas con
Topología de Malla. *DSpace en ESPOL*. Obtenido de
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/62186>
- Beaton, W. (2021). Eclipse mosquito™. *projects.eclipse.org*. Obtenido de
<https://projects.eclipse.org/projects/iot.mosquitto>
- Bohórquez P, M., & Taco G, B. (2023). Diseño de una red LPWAN en la unidad educativa don
bosco. *Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24087/1/TTS1121.pdf>
- Cajas T, K. A. (2022). *Redes de sensores inalámbricos para IoT : automatización de redes
inalámbricas de sensores*. Quito : EPN. Obtenido de
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22656>
- Capterra. (2022). ¿Qué es Ubidots? *Capterra.ec*. Obtenido de
<https://www.capterra.ec/software/1037684/ubidots>
- Carrasco G, E. E. (2020). *Metodología para selección de tecnologías LPWAN para diversas
aplicaciones de internet de las cosas*. Repositorio académico de la Universidad de
Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/179720>

- Chacón P, J. (2021). Análisis de cobertura de la señal wifi para la FAFI mediante un programa gráfico. *Universidad Técnica de Babahoyo*. Obtenido de <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/10510>
- De La Cruz C, D. (2022). Los microcontroladores y el control de motores bipolares. *Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle*. Obtenido de <https://repositorio.une.edu.pe/entities/publication/7aaf44b5-8550-4ccf-aedc-3d809bb0186f>
- Díez B, T., & Heras V, C. D. (2022). *Estudio de las redes LPWAN para IoT. Implementación de la tecnología Sigfox para aplicación de sensores medioambientales*. Repositorio Institucional de Documentos, universidad de Zaragoza, EINA. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/120327>
- Espinosa A, B., & Orellana G, M. (2021). Desarrollo de aplicaciones de monitoreo y control basadas en IoT a través de la plataforma Ubidots. Aplicaciones a sistemas de automatización bajo entornos de simulación. *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20298>
- Faludi, R. (2021). *¿Cómo se comunican los dispositivos de IoT ?* Digi.com. Obtenido de <https://es.digi.com/blog/post/how-do-iot-devices-communicate>
- Fernandez P, L., & Robayo T, A. (2022). Ensamble de un adaptador inalámbrico para el desarrollo del software sniffer en una red LoRaWAN y análisis con Wireshark. *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23442>
- Giménez C, M. (2023). Aplicación de tecnologías facilitadoras para la mejora de un sistema de tratamiento de efluentes de lodos activados. *Universidad Politécnica de Catalunya*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/390948>
- Gómez L, A. (2025). Implementación de un prototipo de posicionamiento GPS y comunicación inalámbrica mediante LoRa con SoC : implementación de un prototipo de posicionamiento GPS y comunicación inalámbrica mediante LoRa con SoC para visualización de la ubicación. *Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26455>

- González B, D. (2024). Análisis de seguridad en Redes Lora. *Universidad de Manizales*.
Obtenido de <https://ridum.umanizales.edu.co/items/acb457f7-6da7-4117-83e5-2ef80005c45c>
- González P, M., Tobón V, D., & Sepúlveda C, L. (2024). Control de potencia de transmisión asistido por aprendizaje automático para LoRaWAN considerando entornos con alta variación de señal a ruido. *IEEE Xplore*, 12. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10497097>
- Heltec. (2025). HT-M02 edge LoRa gateway (V2). *Heltec Automation*.
- Hernández C, S. (2020). <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/106369/7/shernandezc6TFM0120memoria.pdf>. UOC Universidad Abierta de Cataluña. Obtenido de <https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/a539d1db-2bf9-4c01-a827-0f5cbade47be/content>
- Jaszczyszyn, A., Guiguet, M., & Ramón, H. (2024). Comparación de una red LoRaWAN con modelos de propagación en un entorno con vegetación de soja. *Ciencia y tecnología en la electrónica hoy*, 8(2), 101-106. Obtenido de <https://elektron.fi.uba.ar/index.php/elektron/article/view/203>
- Jun, A. D., Hong, S., Lee, W., Lee, K., Joe, I., Lee, K., & Park, T.-J. (2017). Modelado y simulación de LoRa en OPNET. En *Apuntes de clase de ingeniería eléctrica* (págs. 551-559). Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-10-5041-1_88
- León M, K., & Sánchez C, O. (2020). Sistema de monitoreo de variables ambientales en cultivos de papa mediante IOT y energía solar fotovoltaica. *Universidad Católica de Colombia*. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/882179a0-6d1c-4a6b-bba1-c7bc3a5722b3>
- Lilygo. (2025). Heltec LoRa 32 v3 meshtastic 868MHz WiFi BLE OLED. *The Machine Shop*. Obtenido de https://lilygo.cc/products/lora32-v2-1_1-6-de
- Lilygo, R. (2024). LoRa32 V2.1_1.6 [DE]. *LILYGO®*. Obtenido de https://lilygo.cc/products/lora32-v2-1_1-6-de

- López C, A. (2022). Diseño e implementación de sistema de monitorización de ruido acústico a través de una red LoRaWAN. *Universidad de Jaén*. Obtenido de <https://crea.ujaen.es/items/5e747410-29a0-4f98-be64-ce9f670bcee9>
- LoRa Alliance, M. (2024). La consola de red de cosas. *The Things Network*. Obtenido de <https://www.thethingsnetwork.org/docs/network/console/>
- Lucas R, d., Arlindo F, d., & Lauro P, N. (2018). Revisão sistemática da literatura sobre aplicações das tecnologias LoRa e LoRaWAN. *Anais Estendidos do Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais (SBESC)*. Obtenido de https://sol.sbc.org.br/index.php/sbesc_estendido/article/view/11002
- Martinez A, O. J. (2024). *Seguridad y eficiencia de redes LoRa y LoRaWAN para estacionamientos*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/66396>
- Miró, L. (2025). Implementación de una interfaz MQTT para lógica programable. *Universidad de Ciencias Aplicadas de Jyväskylä*. Obtenido de <https://www.theseus.fi/handle/10024/891722>
- Monges, Y., Flecha, E., & Chaparro, E. (2023). Integración de IIoT en Smart Grid: Análisis de protocolos MQTT y CoAP en subestaciones digitales. *Revista científica UNE*. Obtenido de http://revistas.une.edu.py/index.php/revista_une/article/view/228
- Muñoz, X. (2019). Tecnología LoraWan. *DSET ENERGY*. Obtenido de <https://www.dset-energy.com/2019/07/12/descripcion-lorawan/>
- Orrala R, V. (2023). Propuesta de arquitectura para capturar datos de buses del transporte público de Guayaquil basada en IOT. *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24172>
- Paredes L, R. (2024). Creación de un prototipo de monitoreo de agricultura inteligente utilizando equipos de desarrollo de bajo costo y comunicación LoRaWAN y WiFi. *Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26165>
- PICmicro. (2020). MCU Estudio - ¿qué es un microcontrolador? *Electronica Estudio*. Obtenido de <https://www.estudioelectronica.com/que-es-un-microcontrolador/>

- PNGkey. (2022). *Internet DE Las Cosas Png - Internet Of Things*. Obtenido de PNGkey.com: https://www.pngkey.com/detail/u2e6w7t4t4a9i1t4_internet-de-las-cosas-png-internet-of-things/
- Ramos G, M. (2022). Estudio de la tecnología LoRaWAN mediante la implementación de un prototipo de medición de humedad y temperatura. *Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22036>
- Reales IoT. (2025). LoRaWAN vs. NB-IoT. *Cloudstudio*. Obtenido de <https://www.cloud.studio/lorawan-vs-nb-iot-mejor-conectividad/>
- Revelo V, E., & Egas A, C. (2023). Implementación de un sistema para evaluar la cobertura de la red sigfox en el interior de edificaciones. *Enfoque UTE*, 14(1), 33-45. Obtenido de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422023000100033
- Sandy C, C. (2021). Integridad y confidencialidad de datos en redes IoT LoRaWan. *Repositorio institucional UQROO*. Obtenido de <http://192.100.164.85/handle/20.500.12249/2757>
- Santana P, A. (2023). Desarrollo de aplicación de Internet de las cosas usando protocolos LoRa y LoRaWAN. *Universidad de la Laguna*. Obtenido de <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/33632>
- Seri, G. (2024). *Monitoreo de ambientes con redes LPWAN LoRA*. Obtenido de Universidad Abierta Interamericana: <https://repositorio.uai.edu.ar/items/28009b34-ccc8-4dbc-a721-1b07b686581d>
- Shopify. (2024). ¿Qué es SigFox y cómo funciona? -. *330 ohms*. Obtenido de <https://www.330ohms.com/blogs/blog/que-es-sigfox-y-como-funciona>
- Tello O, L., & Castro L, S. (2022). Análisis y diseño de un mecanismo de control de congestión en la Tecnología NB-IoT para despliegues de comunicación masiva de Internet de las Cosas. *Universidad Nacional de Chimborazo*. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/8655>
- Toloz M, Y. (2024). Diseño y desarrollo de un sistema de telecontrol de válvulas mediante la tecnología LoRaWAN y los módulos LoRa RYLR998. *Repositorio Institucional RI-UTS*. Obtenido de <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/18220>

- Tonato C, C. E., & Sinche M, S. L. (2022). Análisis comparativo entre arquitecturas de sistemas IoT. *Revista de investigación en tecnologías de la información*, 10(21), 55-70.
- Valarezo G, K. P., & Román R, M. E. (2021). *Comunicación y Big Data en las empresas ecuatorianas*. DUGiDocs. Obtenido de <https://dugi-doc.udg.edu/handle/10256/19791>
- Vásquez P, C., & León M, D. (2024). Diseño e implementación de los módulos didácticos complementarios para entrenamiento de microcontroladores de la familia PIC18F4550. *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27924>
- Velásquez V, P. (2023). Prototipo de un sistema de telemetría para la medición de agua potable residencial utilizando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN. *Universidad de San Carlos de Guatemala*. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/19338>
- Venco, E. (2022). Qué es LoRa, cómo funciona y características principales. *VENCO*. Obtenido de <https://www.vencoel.com/que-es-lora-como-funciona-y-caracteristicas-principales/>
- Wifx, I. (2021). Conexiones seguras con la pila The Things Network v3. *Wifx IoT*. Obtenido de <https://iot.wifx.net/en/secured-connections-with-the-things-network-v3-stack/>
- Wikipedia, C. d. (2025). Chirp spread spectrum. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Obtenido de https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chirp_spread_spectrum&oldid=1275036036
- Zambrano S, G., & Velez Z, J. (2024). Desarrollo de una Interfaz de Hardware y Software para la Transmisión de Datos de Geolocalización y Estado de Drones a través de LoRaWAN. *Dspace en ESPOL*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/62208>
- Zennaro, M., Pelsser, C., Albinet, F., & Manzoni, P. (2020). Evaluación del desempeño de las NREN en la implementación de IoT en África: el caso de TTN. *IEEE Xplore*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9045213>