

Análisis de desempeño de la tecnología LoRaWAN como medio de comunicación para monitoreo remoto de variables asociadas a la prestación de servicio de gas de dispositivos desarrollados por la empresa Iot Tech Solutions S.A.S.



Brigide Camila Urbano Ibarra

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales
Programa Ingeniería Electrónica
Popayán – Cauca
2025

Análisis de desempeño de la tecnología LoRaWAN como medio de comunicación para monitoreo remoto de variables asociadas a la prestación de servicio de gas de dispositivos desarrollados por la empresa Iot Tech Solutions S.A.S.



Brigide Camila Urbano Ibarra

Trabajo de grado modalidad Investigación para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Mag. Víctor Hugo Ruiz Guacheta

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales

Programa Ingeniería Electrónica

Popayán – Cauca

2025

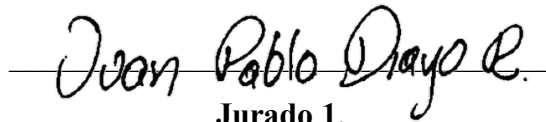
Nota de Aceptación

Una vez revisado y aprobado el documento final del trabajo de grado titulado *Análisis de desempeño de la tecnología LoRaWAN como medio de comunicación para monitoreo remoto de variables asociadas a la prestación de servicio de gas de dispositivos desarrollados por la empresa Iot Tech Solutions*, realizado por la estudiante Brigide Camila Urbano Ibarra. Se autoriza para optar el título de profesional de Ingeniero Electrónico en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



Director.

Víctor Hugo Ruiz Guachetá



Jurado 1.

Juan Pablo Diago Rodríguez



Jurado 2.

Yesid Enrique Castro Caicedo

Popayán, 2025

Dedicatoria

Este trabajo de grado es dedicado al preciado recuerdo de mi abuela Afra Marina y primo Roger Felipe, cuyo amor, sabiduría y presencia guían mis pasos incluso en su ausencia. Es un homenaje a su influencia duradera y a los valores que me inculcaron; los extraño mucho. Pronto estaremos juntos.

Brigide Camila Urbano Ibarra

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a Dios por acompañarme en este camino y darme la fuerza necesaria para superar los momentos difíciles. Segundo, quiero agradecerles a mis padres y a mi tía María, cuyo apoyo incondicional ha sido mi mayor motivación para seguir adelante. Con su amor, siempre me han impulsado a alcanzar mis metas, incluso cuando las dificultades parecían insuperables. Además, su respaldo emocional y material me permitió enfocarme por completo en mis estudios.

También quiero agradecer a mi director, cuya paciencia y dedicación han sido importantes para este logro. Su guía y consejos marcaron una gran diferencia en este proceso en esta etapa tan importante de mi vida.

Tabla de Contenido

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO I: PRELIMINARES	16
<i>A. Planteamiento del Problema</i>	16
<i>B. Justificación</i>	17
<i>C. Objetivos</i>	19
1) <i>Objetivo General</i>	19
2) <i>Objetivos Específicos</i>	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.	20
<i>A. Tecnologías de comunicación IoT</i>	20
1) <i>Redes de corto alcance.</i>	21
2) <i>Redes de largo alcance.</i>	21
<i>B. LoRaWAN</i>	24
1) <i>Mensajes de comunicación LoRaWAN</i>	27
2) <i>Nodo de comunicación</i>	28
3) <i>Gateway</i>	29
4) <i>Regulación del protocolo LoRaWAN</i>	30
<i>C. Arquitecturas de medición inteligente</i>	32
1) <i>AMR.</i>	33
2) <i>AMI.</i>	33
<i>D. Conceptos sobre comunicaciones por RF</i>	34
1) <i>Potencia en RF</i>	34
2) <i>Nivel de potencia.</i>	35
3) <i>EIRP.</i>	36
4) <i>Antenas en RF</i>	36
<i>E. Antenas en IoT</i>	38
<i>F. Parámetros de desempeño de la red LoRaWAN</i>	40
1) <i>RSSI</i>	40
2) <i>SNR.</i>	40

3) SF	43
4) DR	44
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE TRABAJO.	45
A. Fase 1: Estudio tecnológico de comunicaciones IoT – LoRaWAN.....	49
B. Fase 2: Diseño del escenario de prueba.	51
1) Escenario de Prueba No. 1.	51
2) Escenario de Prueba No. 2.	59
CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS.....	63
A. Recolección y análisis de datos.....	63
1) Escenario de Prueba No. 1.	64
2) Escenario de Prueba No. 2.	80
CONCLUSIONES.	107
TRABAJOS FUTUROS.....	108
BIBLIOGRAFÍA.	109

Lista de Figuras

Fig 1. Arquitectura de la red SigFox.	22
Fig 2. Arquitectura de la red NB IoT.	23
Fig 3. Casos de uso de la red LoRa.....	24
Fig 4. Arquitectura de la red LoRaWAN.....	26
Fig 5. Pila de protocolo de la red LoRa y LoRaWAN.	27
Fig 6. Transmisión Uplink.....	27
Fig 7. Transmisión Downlink.....	28
Fig 8. Tipos de nodos en una red LoRaWAN.....	28
Fig 9. Arquitectura de medición avanzada AMR.	33
Fig 10. Arquitectura de medición avanzada AML.....	34
Fig 11. Antena Dipolo.....	38
Fig 12. Antena PCB.....	38
Fig 13. Antena de parche.....	39
Fig 14. Antena de fibra de vidrio.....	39
Fig 15. Antena de dipolo plegado.....	39
Fig 16. SNR positivo.....	41
Fig 17. SNR negativo.....	42
Fig 18. Valores de SF de la red LoRa.	43
Fig 19. Diagrama de metodología de la investigación.....	46
Fig 20. Topografía de red de los escenarios de prueba No. 1 y No. 2.	52
Fig 21. Interfaz del servidor de red ChirpStack.....	53
Fig 22. Gateway Milesight UG67.....	54
Fig 23. Modulo IoT DGML.....	54
Fig 24. Posición del módulo IoT respecto al Gateway.....	55
Fig 25. Zona de distancia de medición de toma de datos corta (80 - 215) m.....	56
Fig 26. Zona de distancia de medición de toma de datos media (250-490) m.....	56
Fig 27. Zona de distancia de medición de toma de datos larga (500 - 590) m.....	57
Fig 28. Servidor de aplicaciones de los escenarios de prueba No. 1 y No. 2.....	58
Fig 29. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por orientación del módulo IoT.	69

Fig 30. Gráfico de línea de comparación de RSSI medido vs. RSSI teórico en función de la Distancia.	72
Fig 31. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por orientación del módulo IoT.	74
Fig 32. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por combinación de SF y DR.	76
Fig 33. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por combinación de SF y DR.	76
Fig 34. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por combinación de DR	85
Fig 35. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por combinación de DR (raw y promedio)	87
Fig 36. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por combinación de SF.	88
Fig 37. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia respecto a las zonas de sombra.	90
Fig 38. Gráfico de RSSI: Teórico vs. Real.	92
Fig 39. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por combinación de DR.	94
Fig 40. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por combinación de DR (raw y promedio).	96
Fig 41. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por combinación de SF.	97
Fig 42. Gráfico de línea del Consumo Energético vs. SF.	98
Fig 43. Gráfico de correlación de RSSI vs. SNR.	99
Fig 44. Gráfico de línea de PDR vs. Distancia.	101

Lista de Tablas

Tabla I. Comparación de las tecnologías IoT y sus especificaciones de alcance.	21
Tabla II. Canales para comunicación de mensajes Uplink banda AU 915.	31
Tabla III. Canales adicionales para comunicación de mensajes Uplink banda AU 915.	32
Tabla IV. Canales para comunicación de mensajes Downlink banda AU 915.	32
Tabla V. Reglas generales del nivel de potencia en RF.	36
Tabla VI. SNR requerido para la demodulación en diferentes factores de dispersión.	42
Tabla VII. Relación entre SF y sensibilidad.	43
Tabla VIII. Cuadro resumen del Capítulo II: Marco Teórico.	49
Tabla IX. Parámetros fijos de la configuración del escenario de prueba No. 1.	58
Tabla X. Parámetros variables evaluados del escenario de prueba No. 1.	59
Tabla XI. Parámetros fijos de la configuración del escenario de prueba No. 2.	61
Tabla XII. Parámetros variables evaluados del escenario de prueba No. 2.	62
Tabla XIII. Datos tomados del escenario de prueba No. 1.	65
Tabla XIV. Estadísticas de RSSI por orientación del módulo IoT.	70
Tabla XV. Datos de PL y RSSI teóricos en función de la distancia.	73
Tabla XVI. Datos tomados del escenario de prueba No. 2.	81
Tabla XVII. Observaciones por criterio de RSSI respecto al DR.	86
Tabla XVIII. Tendencia de RSSI respecto al DR (raw y promedio).	87
Tabla XIX. Comportamiento de RSSI respecto al SF.	89
Tabla XX. Recomendaciones de análisis de resultados del escenario de prueba No. 2.	104
Tabla XXI. Recomendaciones finales por rango de distancia de los escenarios de prueba No. 1 y No. 2.	106

Lista de Acrónimos

IoT: Internet of Things.

BLE: Bluetooth Low Energy.

NFC: Near Field Communication.

UDP: User Datagram Protocol.

MQTT: Message Queuing Telemetry Transport.

ISM: Industrial, Scientific, and Medical.

FSK: Frequency-Shift Keying.

IP: Internet Protocol.

AMR: Automatic Meter Reading.

AMI: Advanced Metering Infrastructure.

M2M: Machine to Machine.

eMTC: Extended Machine Type Communication.

EIRP: Effective Isotropic Radiated Power.

LPWAN: Low Power Wide Area Network.

NB IoT: Narrow band IoT.

Chirp: Compressed High Intensity Radar Pulse.

CCS: Chirp Spread Spectrum.

DGML: Directed Graphics Market Language.

RSSI: Received Signal Strength Indicator.

SNR: Signal to Noise Ratio.

SF: Spreading Factor.

ADR: Adaptive Data Rate.

DR: Data Rate.

FSPL: Free Space Path Loss.

PDR: Packet Delivery Ratio.

RESUMEN

Hoy en día, el uso de tecnologías como el Internet de las Cosas o IoT se ha convertido en una tendencia importante para automatizar procesos, como la medición del consumo en servicios públicos. Esta tecnología tiene muchos beneficios, como un mejor control y análisis de los patrones de consumo, lo que permite crear estrategias más eficientes para gestionar el servicio, establecer tarifas según horarios y mejorar la recuperación de cartera, entre otros aspectos.

Este trabajo de grado de investigación, presentado en forma de monografía, se enfoca en evaluar de manera práctica el rendimiento de la tecnología LoRaWAN como medio de comunicación para el monitoreo remoto de variables relacionadas con la prestación del servicio de gas. Para ello, se han utilizado módulos IoT de comunicación desarrollados por la empresa IoT Tech Solutions S.A.S., con el fin de analizar cuán eficiente y confiable es esta tecnología al recopilar y transmitir datos importantes para asegurar un funcionamiento óptimo de los sistemas de gas. Además, esta investigación incluye un análisis de los factores y parámetros que intervienen en el proceso de comunicación, explorando cómo estos pueden afectar la transmisión de datos desde el campo hacia un servidor de red a través del protocolo LoRaWAN.

Palabras claves: Automatización, LoRaWAN, tecnologías IoT, servicios públicos.

ABSTRACT

Today, the use of technologies such as the Internet of Things (IoT) has become an important trend for automating processes, such as measuring consumption in public services. This technology offers many benefits, including better control and analysis of consumption patterns, which makes it possible to develop more efficient strategies for managing the service, establish rates according to schedules, and improve portfolio recovery, among other aspects.

This research thesis, presented in the form of a monograph, focuses on practically evaluating the performance of LoRaWAN technology as a communication medium for the remote monitoring of variables related to the provision of gas services. For this purpose, IoT communication modules developed by the company IoT Tech Solutions S.A.S. were used to analyze how efficient and reliable this technology is in collecting and transmitting essential data to ensure the optimal operation of gas systems. In addition, this research includes an analysis of the factors and parameters involved in the communication process, exploring how these may affect the transmission of data from the field to a network server through the LoRaWAN protocol.

Keywords: Automation, LoRaWAN, IoT technologies, public services.

INTRODUCCIÓN

El Internet de las Cosas o IoT se ha establecido como una tecnología importante para la recolección y gestión de datos, al permitir la automatización de procesos como la medición y el control de parámetros importantes [1], [2]. En el caso de Colombia, esta tendencia tomó mayor impulso con la radicación de la Resolución 40072 de 2018, la cual fomenta el uso de tecnologías de medición avanzada para mejorar la gestión energética [3]. Sin embargo, las condiciones reales de Colombia, como la variabilidad en la construcción de nichos para medidores de gas y agua, generan retos específicos de implementación que requieren soluciones ajustadas a la realidad local [4].

Este trabajo de grado de modalidad monografía tiene como objetivo analizar cómo LoRaWAN puede ser utilizada como una tecnología eficiente para el monitoreo remoto de variables relacionadas con la prestación del servicio de gas. LoRaWAN pertenece al grupo de redes de área amplia de baja potencia o LPWAN, las cuales resaltan por su capacidad para conectar numerosos dispositivos a bajo costo, su bajo consumo energético y su amplia cobertura de transmisión. Estas características la convierten en una opción ideal para aplicaciones de IoT, especialmente en sectores donde se necesita un monitoreo constante y confiable, como la energía, el agua y el gas [5].

La empresa caucana IoT Tech Solutions S.A.S. es líder en el desarrollo de dispositivos IoT, la cual busca ampliar su portafolio incorporando nuevas tecnologías como LoRaWAN. Esta investigación apoya la iniciativa mediante la evaluación y ejecución de un protocolo de pruebas que evalúa aspectos críticos como la tasa de error, la latencia y el consumo energético en dispositivos de monitoreo. Los resultados obtenidos permitirán realizar ajustes en los dispositivos y mejorar la oferta de productos para su implementación a gran escala [6].

En la investigación se crean dos escenarios de pruebas No. 1 el cual evaluó cómo la orientación del módulo IoT respecto al Gateway afecta la calidad del enlace, analizando RSSI (Indicador de señal recibida) y SNR (Relación Señal-Ruido) en tres zonas de distancia, con parámetros de comunicación constantes SF (Factor de esparcimiento) y DR (Tasa de datos) intermedios y el escenario de prueba No. 2 en el cual se analizó la calidad del enlace con distintas combinaciones de SF y DR, usando la orientación con mejor rendimiento del escenario No. 1 y las mismas zonas de distancia, para obtener comparabilidad para así, evaluar estabilidad, cobertura y

eficiencia energética en condiciones reales, lo que permite analizar variables estratégicas para la comunicación, como RSSI, SNR, SF y DR. Estos parámetros son esenciales para evaluar la calidad del enlace, la eficiencia energética y la estabilidad de la transmisión en distintos escenarios. Además de validar el desempeño de LoRaWAN, los resultados obtenidos servirán para formular recomendaciones que faciliten su implementación en condiciones reales, impulsando la modernización de los servicios públicos y fortaleciendo la infraestructura tecnológica del país.

CAPÍTULO I: PRELIMINARES

En este capítulo se tiene como objetivo plantear la problemática, la justificación y la creación de objetivos del trabajo de grado de investigación en modalidad de monografía, para una mejor comprensión, se ha estructurado en tres partes: planteamiento del problema, justificación y objetivos.

A. Planteamiento del Problema

La tecnología IoT combina componentes de hardware y software con el propósito de monitorear variables de manera automática, entre ellas temperatura, presión, consumo eléctrico, señales de emergencia, posición GPS y parámetros asociados a la prestación de servicios públicos [7]. Estos sistemas permiten recopilar datos en tiempo real y automatizar procesos, lo cual se traduce en una gestión más eficiente de recursos y una reducción de costos operativos [8]. En los últimos años, las tendencias del mercado han impulsado la necesidad de soluciones más flexibles, ágiles y eficientes, capacidades que ofrecen las plataformas inteligentes [9]. Su implementación genera beneficios tangibles, como el incremento de la productividad, una mejor comprensión de los entornos de operación, la optimización del servicio al cliente y la creación de nuevas oportunidades de negocio [10], [11].

En Colombia también se evidencia la tendencia de implementación de tecnologías IoT. Un ejemplo concreto es la Resolución 40072 de 2018, que establece la proyección de tecnologías de medición avanzada para la automatización del monitoreo del consumo de energía eléctrica, conforme a lo dispuesto en su artículo 4º [4], [12]. El objetivo principal de esta resolución es implementar sistemas de medición avanzada en el país para facilitar programas de eficiencia energética, respuesta a la demanda y modelos tarifarios dinámicos, como tarifas por hora y canastas tarifarias. Según el artículo 5º, estas tecnologías deben contar con funcionalidades determinantes como almacenamiento de datos, ciberseguridad y sincronización, entre otros aspectos esenciales para potenciar el control de los servicios públicos [3]. Además, en el país se han desarrollado varios proyectos piloto para el despliegue de estas tecnologías en otros sectores, como la prestación de servicios de gas y agua, impulsando así la modernización de la infraestructura y la eficiencia en la gestión de recursos.

La empresa Caucana IoT Tech Solutions S.A.S. es pionera en Colombia en el desarrollo y comercialización de dispositivos de monitoreo basados en tecnología Sigfox [6]. Estos dispositivos tienen la capacidad de adquirir y transmitir variables importantes para la prestación del servicio de gas, como el consumo, así como detectar alarmas ante posibles fraudes o fallas en el suministro. Sin embargo, el uso exclusivo de Sigfox plantea desafíos en términos de cobertura, escalabilidad y adaptabilidad a otras aplicaciones dentro del ecosistema de IoT. Como parte de su estrategia de expansión, la empresa pretende ampliar su portafolio tecnológico evaluando alternativas que permitan el transporte de datos en otros servicios, como el monitoreo de medidores de agua. Una de las propuestas más prometedoras es la adopción de redes basadas en LoRaWAN [13]. Sin embargo, antes de su implementación a gran escala, es fundamental realizar un protocolo de pruebas que permita evaluar el desempeño de esta tecnología en escenarios reales. Esto implica analizar su eficiencia en diferentes entornos, considerando las condiciones reales de instalación de medidores en la región, los posibles obstáculos para la transmisión de datos y la estabilidad del enlace en distintas condiciones ambientales.

El desarrollo de este protocolo de pruebas es importante para obtener información precisa de campo que facilite la adaptación de los productos de la empresa y la oferta de soluciones ajustadas a las condiciones reales de instalación. Por lo tanto, el problema que se plantea es cómo realizar un análisis de desempeño de variables de comunicación de la tecnología LoRaWAN como medio de comunicación para monitoreo remoto de variables asociadas a la prestación de servicios de gas de dispositivos desarrollados por la empresa IoT Tech Solutions S.A.S.

B. Justificación

En la actualidad, la aplicación de tecnologías IoT para la automatización de la medición del consumo en los servicios públicos es una tendencia en crecimiento, impulsada por sus múltiples beneficios. Estos incluyen un control más preciso y detallado del consumo, lo que facilita la planificación y optimización de la prestación del servicio, la implementación de esquemas de tarificación dinámica según horarios, la reducción de pérdidas no técnicas y una mejor gestión de la cartera de clientes, entre otros. Si bien en muchos países ya se han desplegado redes IoT para este propósito, en Latinoamérica, y particularmente en Colombia, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos específicos debido a las condiciones de instalación de los medidores de consumo. En el caso de los servicios de gas y agua, los medidores suelen ubicarse en estructuras

denominadas nichos, donde se realiza la acometida e instalación del dispositivo de registro. Sin embargo, estas estructuras no están estandarizadas y varían ampliamente en materiales de construcción, dimensiones y ubicación, lo que puede afectar el desempeño de los dispositivos IoT [14].

La falta de uniformidad en las condiciones de instalación representa un reto significativo para la transmisión de datos en tiempo real, ya que factores como la interferencia en la señal, la accesibilidad a los medidores, la durabilidad de los dispositivos y las condiciones ambientales pueden influir en su operatividad. Por ello, es fundamental evaluar tecnologías de comunicación que se adapten a estas condiciones y garanticen un funcionamiento eficiente y confiable.

Este trabajo se justifica en la necesidad de identificar, evaluar y analizar tecnologías del IoT que permitan superar las barreras técnicas y operativas en la automatización de la medición de consumo en Colombia. Al desarrollar planes de pruebas en entornos reales, se podrá determinar el rendimiento de tecnologías como LoRaWAN en condiciones específicas del país, optimizando su implementación y facilitando la modernización de la infraestructura de servicios públicos. Además de mejorar la eficiencia operativa de las empresas prestadoras, este tipo de implementación favorecerá la transformación digital del sector, promoviendo el uso de soluciones duraderas y novedosas para la gestión de recursos esenciales [15].

El IoT se ha posicionado como una tecnología importante para mejorar la eficiencia operativa de las organizaciones y responder a las nuevas demandas de digitalización. En el sector de los servicios públicos, su adopción ha permitido mejorar la gestión de equipos, infraestructura y procesos, integrando la información en plataformas digitales para un control más preciso [16]. Este tipo de soluciones favorece la toma de decisiones estratégicas basadas en datos, con ventajas en seguridad, escalabilidad y sostenibilidad, aspectos fundamentales para modernizar la prestación de servicios en países como Colombia. En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo analizar el desempeño de la tecnología de comunicación LoRaWAN en condiciones reales, evaluando diversas variables que permitan determinar su capacidad de adaptación en distintos entornos operativos. Este análisis es de gran importancia para la empresa IoT Tech Solutions S.A.S., ya que le proporcionará información esencial para mejorar el diseño y la funcionalidad de sus dispositivos de monitoreo.

A través de esta investigación, la empresa podrá identificar fortalezas y limitaciones de LoRaWAN, permitiéndole realizar ajustes en su hardware y software con base en datos reales. Esto

no solo mejorará la eficiencia y confiabilidad de sus productos, sino que también facilitará la planificación de despliegues masivos, asegurando que la tecnología se adapte a las condiciones específicas de los clientes y del mercado colombiano. Además, el desarrollo de este estudio posicionará a la empresa IoT Tech Solutions S.A.S. como un referente en innovación y validación tecnológica en IoT, impulsando su nivel de eficiencia y permitiéndole ampliar su portafolio con soluciones más robustas y adaptadas a las necesidades reales del mercado. La capacidad de ofrecer productos con protocolos de pruebas de desempeño verificados en campo aumentará la confianza de los clientes y consolidará su liderazgo en la digitalización de los servicios públicos.

C. Objetivos

1) Objetivo General

Realizar un análisis de desempeño de variables de comunicación de la tecnología LoRaWAN como medio de comunicación para monitoreo remoto de variables asociadas a la prestación de servicios de gas de dispositivos desarrollados por la empresa IoT Tech Solutions S.A.S.

2) Objetivos Específicos

- Realizar contextualización sobre la tecnología de comunicación para aplicaciones IoT LoRaWAN para las bandas de operación en Colombia.
- Evaluar las metodologías de prueba aplicadas en el escenario de prueba No 1 y No 2, con el fin de analizar el desempeño de las variables de comunicación, tasa de error, latencia y consumo energético de un dispositivo IoT que opera bajo el protocolo LoRaWAN, aplicado a un entorno real de medición de consumo de gas.
- Realizar análisis de la información recolectada mediante ejecución de protocolo de escenarios de prueba.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

Este capítulo tiene como objetivo contextualizar conceptos importantes para el desarrollo de la investigación. Para una mejor comprensión, se ha estructurado en tres partes: la primera aborda los principios de IoT y las tecnologías de comunicación en general; la segunda profundiza en las características y el funcionamiento de LoRaWAN; y la tercera explora las tecnologías de medición inteligente, como la Lectura Automática del Medidor (AMR) y la Arquitectura de Medición Avanzada (AMI).

A. Tecnologías de comunicación IoT

Las redes de comunicación constituyen uno de los principales habilitadores en la implementación de proyectos de IoT, ya que permiten la interconexión entre dispositivos, sensores y plataformas de gestión. Gracias a ellas es posible transmitir datos de manera continua y disponer de información en tiempo real para la operación de sistemas inteligentes. En el caso de las redes IoT, sus características las hacen especialmente adecuadas para aplicaciones de monitoreo y automatización: operan con bajas tasas de transmisión de datos, requieren poca energía y pueden ofrecer tanto conectividad de largo alcance como servicios de localización satelital. Además, soportan comunicaciones bidireccionales seguras, lo que garantiza confiabilidad en la transmisión de la información [17]. Estas ventajas las convierten en una opción eficiente para protocolos donde se necesita mantener dispositivos conectados durante largos períodos y en condiciones de cobertura amplia.

Las tecnologías de comunicación basadas en IoT, como LoRaWAN o Sigfox, están diseñadas específicamente para satisfacer las demandas de las redes de largo alcance, permitiendo la conexión de una gran cantidad de dispositivos en áreas rurales o urbanas sin la necesidad de infraestructura costosa. Estas tecnologías son especialmente útiles en aplicaciones como la automatización de servicios públicos (por ejemplo, monitoreo de consumo de agua, gas y electricidad), sistemas de gestión de tráfico, control de activos, monitoreo ambiental y trazabilidad en cadenas de suministro. Al integrar estas redes, las organizaciones pueden obtener información en tiempo real, potenciar recursos, mejorar la eficiencia operativa y tomar decisiones informadas basadas en datos precisos y confiables [18]. En la Tabla I se muestran diferentes tecnologías de IoT donde se comparan algunas características de forma general.

Tabla I.

Comparación de las tecnologías IoT y sus especificaciones de alcance.

Tecnología	Consumo	Alcance	Madurez	Disponibilidad	Seguridad	Usabilidad	Tasa de Dato
GSM/GPRS	Muy alto	Alto	Muy alto	Muy alto	Alta	Alta	Alta
SigFox	Bajo	Medio		Medio	Media	Alta	Muy baja
LoRa	Bajo	Medio	Bajo	Muy bajo	N A	Baja	Muy baja
NB IoT							
WIFI	Alto	Bajo	Muy alto	Alto	Baja	Alta	Muy alto
BLE	Muy bajo	Muy bajo	Alto	Bajo	Baja	Medio	Baja
ZigBee	Medio	Bajo	Medio	Muy bajo	Alta	Baja	Baja

Nota: datos tomados de eFor [18].

1) Redes de corto alcance.

Las tecnologías de comunicación de corto alcance incluyen BLE, ZigBee, Wi-Fi y NFC. Estas tecnologías son ideales para entornos donde la comunicación se da en distancias reducidas y se requiere un alto rendimiento en la transferencia de datos. Wi-Fi, por ejemplo, proporciona una alta velocidad de transmisión, pero consume mucha energía, mientras que ZigBee y BLE son opciones más eficientes en términos de consumo energético, aunque con menor capacidad de transmisión de datos, como se describe en la Tabla I. Estas tecnologías se utilizan ampliamente en hogares inteligentes, dispositivos portátiles y sistemas de automatización industrial [17].

2) Redes de largo alcance.

Las redes de largo alcance o LPWAN están diseñadas para ofrecer conectividad en aplicaciones donde los dispositivos deben transmitir datos a largas distancias con un consumo de energía reducido [17]. Entre las principales tecnologías LPWAN se encuentran:

SigFox: Es una red global de conectividad celular centrada en el IoT. La red está diseñada para comunicaciones de baja velocidad, reduciendo el costo y el consumo de energía de los dispositivos conectados, además de las bajas velocidades, la comunicación se basa en bandas de frecuencia muy estrechas, lo que permite a los dispositivos atravesar obstáculos con alta sensibilidad de enlace y facilitar la comunicación a largas distancias, incluso en zonas urbanas. La red SigFox se basa en una estructura compuesta por antenas y estaciones base repartidas por el área, que se comunican con los sensores finales y el servidor SigFox donde se almacenan los datos. En la Fig 1 se puede observar la arquitectura de la red SigFox [19].

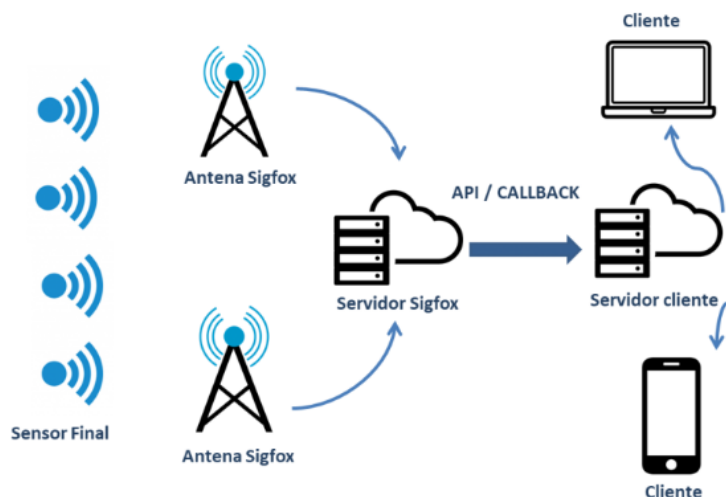


Fig 1. Arquitectura de la red SigFox.

Fuentes. Productos IoT [19].

IoT de banda estrecha o NB IoT: Es una tecnología que forma parte de las redes LPWAN o sus siglas en español: Red de área de baja potencia, diseñadas para ofrecer bajo consumo energético, ancho de banda reducido y un amplio rango operativo. Esta tecnología móvil está específicamente orientada a satisfacer las necesidades de conectividad de dispositivos IoT, siendo ideal para aquellos que requieren transferencias pequeñas de datos durante largos períodos de tiempo, especialmente en entornos de difícil acceso. Desarrollada por 3GPP, NB-IoT proporciona soluciones avanzadas de conectividad para el desarrollo del IoT, también conocido como eMTC. Ofrece una cobertura de red confiable y soporta conexiones de alta densidad, permitiendo una integración fluida con las redes móviles existentes [20]. En la Fig 2 se puede observar la arquitectura de la red NB IoT.

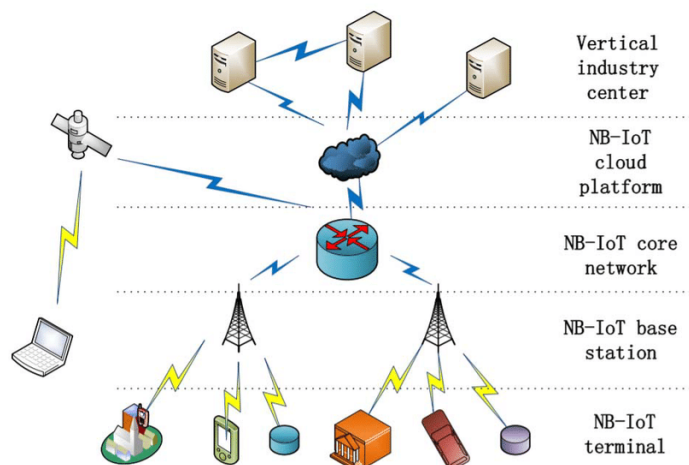


Fig 2. Arquitectura de la red NB IoT.

Fuente. ResearchGate [21].

LoRa: Es una tecnología de comunicación inalámbrica basada en una modulación de espectro ensanchado conocida como CSS, desarrollada por Semtech. Este tipo de modulación, tradicionalmente utilizada en entornos como la defensa y la exploración espacial, proporciona alta sensibilidad y alcance para redes de baja potencia. Actualmente, la tecnología LoRa se rige por LoRa Alliance, que certifica a cualquier fabricante de hardware que desee utilizar la tecnología, Esta tecnología ofrece múltiples ventajas que la hacen ideal para aplicaciones específicas [22]:

- Alta tolerancia a la interferencia: diseñada para operar de manera confiable incluso en entornos con ruido o interferencias.
- Alta sensibilidad en la recepción: con capacidad de detectar señales extremadamente débiles, alcanzando hasta -168 dBm.
- Basada en modulación chirp: utiliza una técnica de modulación de frecuencia variable que mejora la robustez de la transmisión de datos a largas distancias.
- Bajo consumo de energía: permite una duración de batería de hasta 10 años, optimizando los costos de mantenimiento y operación.
- Comunicación a larga distancia: proporciona un alcance de hasta 20 km, lo que la hace adecuada para aplicaciones rurales o de gran cobertura.
- Baja capacidad de transmisión de datos: diseñada para aplicaciones de baja tasa de datos, con un máximo de 255 bytes por paquete.

- Conexión punto a punto (P2P): permite una comunicación directa entre dispositivos, eliminando la necesidad de infraestructura adicional.
- Frecuencias de operación por región:
 - Europa: 868 MHz
 - América: 915 MHz
 - Asia: 433 MHz

La arquitectura de esta tecnología se basa en un modelo de conexión punto a punto (P2P), en el cual los dispositivos se comunican directamente entre sí. Este enfoque simplifica significativamente la implementación, ya que elimina la necesidad de infraestructura centralizada, como Gateways. Esto la convierte en una solución eficiente y rentable para redes descentralizadas, especialmente en aplicaciones donde la autonomía, la simplicidad y el bajo costo son factores esenciales [22].

En la Fig 3, se muestran las áreas de aplicación más comunes de la tecnología LoRa, destacando su versatilidad en diferentes entornos.



Fig 3. Casos de uso de la red LoRa.

Fuente. Moko Smart [23].

B. LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de comunicación inalámbrica diseñado para transmitir pequeñas cantidades de datos a bajas velocidades y en largas distancias, caracterizándose por su bajo consumo energético y por admitir comunicación bidireccional. Estas propiedades lo

convierten en una opción adecuada para diversas aplicaciones de IoT, entre ellas el monitoreo industrial, agrícola y logístico. A diferencia de otras tecnologías inalámbricas, LoRaWAN permite integrar un gran número de dispositivos distribuidos en áreas extensas, manteniendo un equilibrio entre costo, cobertura y escalabilidad. Este comportamiento refleja las ventajas propias de las redes LPWAN, las cuales potencian la implementación de soluciones IoT en entornos de gran despliegue, a nivel general la tecnología LoRaWAN cuenta con las siguientes características [24]:

- Conexiones bidireccionales seguras mediante encriptación de extremo a extremo.
- Bajo consumo de energía.
- Largo alcance de comunicación de hasta 20 km.
- Conexión de sensores y equipos a redes públicas o privadas.
- Bajas velocidades de datos.
- Baja frecuencia de transmisión, movilidad y servicios de localización.

Una red LoRaWAN utiliza una arquitectura donde los diferentes nodos se comunican con un Gateway. Este, a su vez, traduce los datos a un formato convencional como el protocolo UDP o MQTT y los envía al servidor de red (Network Server). En ambos casos es fácil integrar la información de los dispositivos en un sistema de control [24]. En la Fig 4 se observa la arquitectura de una red LoRaWAN. De izquierda a derecha se encuentran dispositivos finales, nodos o end devices, los cuales son los dispositivos IoT que recopilan datos de sensores o realizan acciones específicas, en segundo lugar, están los Gateways, los cuales son los puntos de acceso a la red LoRaWAN. Reciben los mensajes enviados por los dispositivos finales y los transmiten a la red central a través de una conexión de red, como Ethernet, Wi-Fi o celular hacia el servidor de aplicaciones (Aplicación Server), el cual es responsable de la gestión de la red LoRaWAN. Reciben los mensajes de los Gateways y los enrutan hacia el Servidor de aplicaciones correspondiente. También gestionan la autenticación, la seguridad y el enrutamiento de los mensajes dentro de la red; los servidores de aplicaciones procesan los datos enviados por los dispositivos finales; estos pueden ejecutar aplicaciones específicas que analizan, almacenan o actúan sobre los datos recibidos. Proporcionan la interfaz entre los datos de la red LoRaWAN y las aplicaciones finales [25].

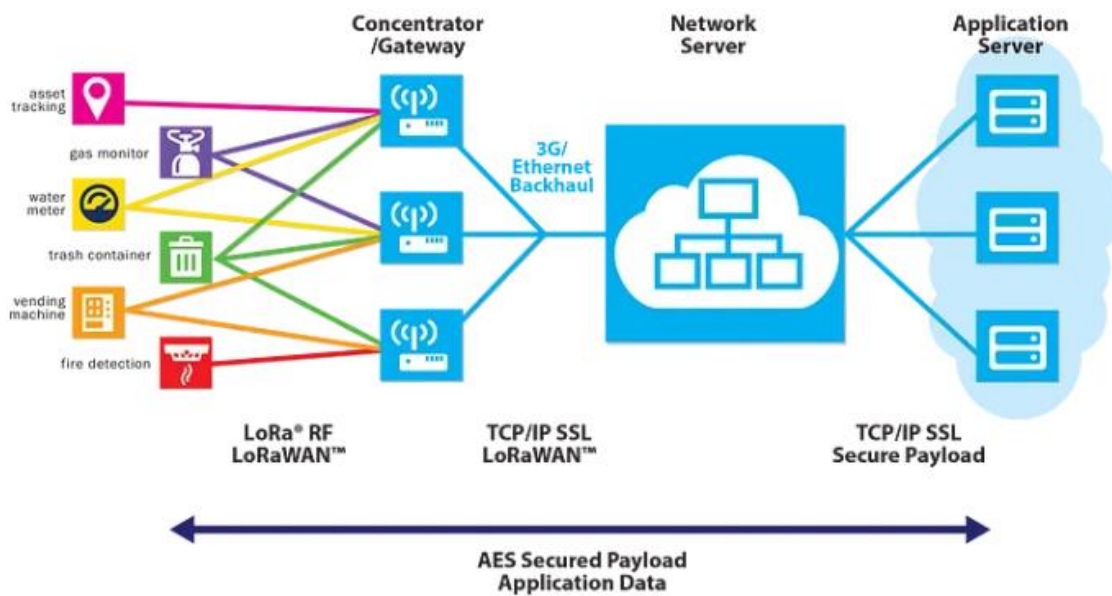


Fig 4. Arquitectura de la red LoRaWAN.

Fuente. Medium [25].

En el modelo de referencia OSI, LoRaWAN se ubica en la Capa de Red, mientras que LoRa actúa en la Capa Física [26]. Esta separación funcional permite definir aspectos como el acceso al medio, los mecanismos de autenticación, los perfiles de los dispositivos y los procesos de encriptación de datos, los cuales se muestran en la Fig 5.

Un elemento relevante de LoRaWAN es su operación en la banda ISM, un espectro de frecuencias disponible de forma no licenciada para aplicaciones de carácter industrial, científico y médico. El uso de esta banda facilita la implementación de soluciones IoT con bajo costo de despliegue, manteniendo a la vez una cobertura amplia y una adecuada confiabilidad en la transmisión. Según la región, LoRaWAN utiliza diferentes bandas ISM para la comunicación de dispositivos IoT. Por ejemplo, en Europa y algunas zonas de Asia, se utiliza mayormente la banda de 868 MHz, conocida como EU 868, mientras que en América y Australia es común emplear la banda de 915 MHz, denominada US 915 y AU 915. Estas frecuencias permiten una comunicación inalámbrica eficiente, de largo alcance y bajo consumo energético, ideal para aplicaciones de IoT [27].

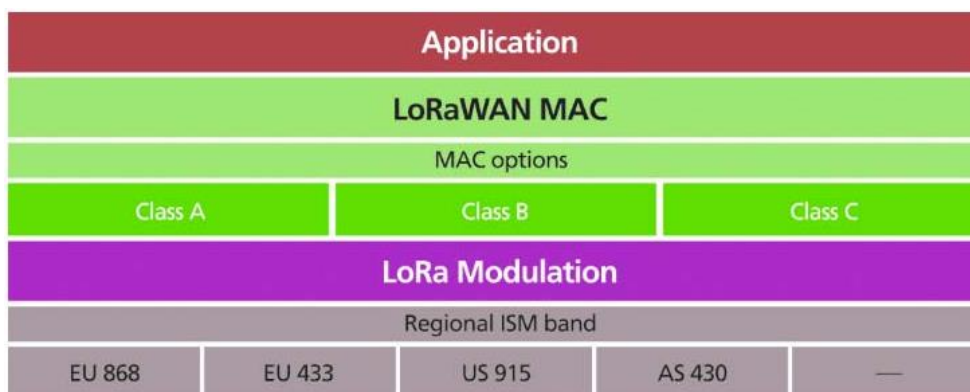


Fig 5. Pila de protocolo de la red LoRa y LoRaWAN.

Fuente. Electro Daddy [28].

1) Mensajes de comunicación LoRaWAN

La red LoRa y LoRaWAN se compone de tres elementos principales: el Gateway, el servidor de red y el servidor de aplicaciones, como se muestra en la Fig 4. Estos componentes necesitan comunicarse entre sí, lo cual se logra mediante dos tipos de mensajes: Uplink y Downlink. A continuación, se describen estos tipos de mensajes.

- **Mensaje ascendente (Uplink):** Los nodos envían mensajes ascendentes que contienen información de campo, como temperatura, humedad, presión y pulsos de consumo de algún servicio, al Gateway. Esta comunicación ascendente es transmitida por los Gateways al servidor de red, que a su vez los envía al servidor de aplicaciones según sea necesario. Esta secuencia de comunicación ascendente se muestra en la Fig 6 [29].

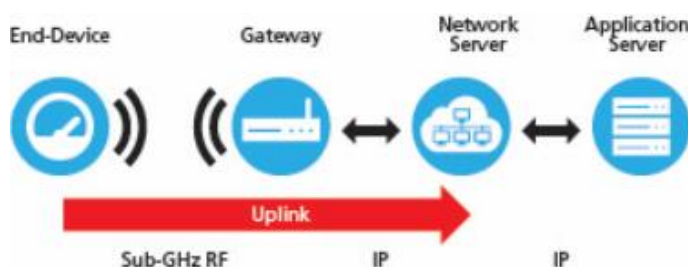


Fig 6. Transmisión Uplink.

Fuente. Semtech [29].

- **Mensaje descendente (Downlink):** El servidor de red utiliza los Gateways para transmitir mensajes descendentes, que pueden ser para la gestión de la red del servidor de

aplicaciones. Esta comunicación descendente se utiliza para ejecutar tareas de gestión en los dispositivos finales, como reconfigurar parámetros de sensores o cambiar los periodos de transmisión, entre otros. En la Fig 7 se pueden apreciar los elementos en este tipo de comunicación [29].

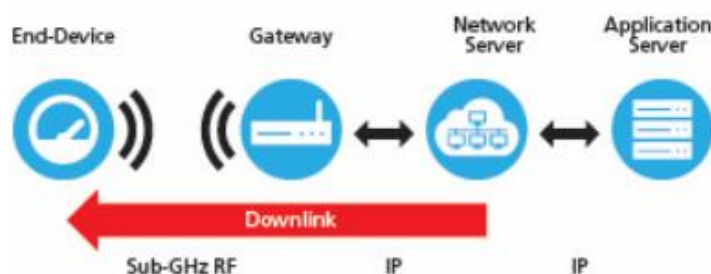


Fig 7. Transmisión Downlink.

Fuente. Semtech [29].

2) Nodo de comunicación.

Los nodos comprenden todos los dispositivos físicos finales que actúan como el origen o el destino de las transmisiones dentro de la red LoRaWAN. Estos dispositivos son responsables de recibir o enviar datos recopilados en el campo. Es importante destacar que los nodos tienen diferente consumo energético de acuerdo con su comportamiento. En este tipo de redes, existen tres clases de nodos: Clase A, Clase B y Clase C, cada una con características específicas tanto en la forma de comunicarse como en la energía que consumen, se muestra en la Fig 8 [30].

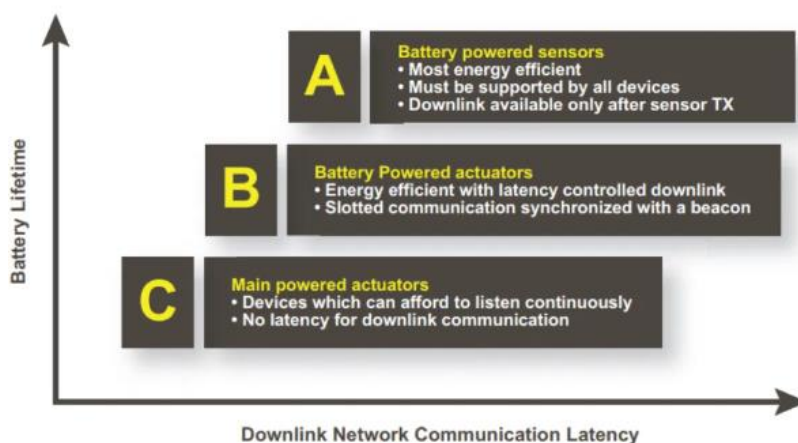


Fig 8. Tipos de nodos en una red LoRaWAN.

Fuente. BelcoveDigital [30].

Los dispositivos de las clases A y B funcionan con baterías, lo que hace que normalmente permanezcan en estado de reposo y solo se activen para enviar datos cuando ocurre un evento. La diferencia principal entre ambas clases está en cómo manejan los mensajes descendentes, es decir, los que van del Gateway al nodo. Los dispositivos de clase A escuchan durante un breve periodo después de enviar un mensaje, optimizando así su consumo de energía. Por otro lado, los de clase B se despiertan de forma periódica para comprobar si hay mensajes dirigidos a ellos. En cambio, los dispositivos de clase C están siempre encendidos y listos para recibir mensajes descendentes en cualquier momento. Esto los hace más adecuados para aplicaciones que requieren disponibilidad constante, aunque su consumo energético es significativamente mayor. La selección entre nodos de clase A, B o C debe hacerse en función de los requerimientos particulares de cada aplicación y de la configuración óptima definida por el usuario o prestador [30].

3) *Gateway.*

En una red LoRaWAN, el Gateway es un dispositivo determinante que actúa como un puente dentro de la arquitectura de la red. Su función principal es recibir los datos enviados por los nodos finales y retransmitir esos paquetes hacia un servidor central, conocido como servidor de red. Además, los datos de un nodo final pueden ser captados por varios Gateways al mismo tiempo, lo que asegura una mayor confiabilidad en la comunicación [31].

El Gateway actúa como el vínculo esencial entre los dispositivos finales y los servidores centrales de la red. Los dispositivos finales se comunican con uno o varios Gateways utilizando tecnologías como LoRa o FSK RF, estableciendo una conexión inalámbrica de un solo salto que forma una topología en estrella. Por su parte, los Gateways se conectan a los servidores centrales a través de conexiones IP estándar, configurando así otra red en forma de estrella. La comunicación entre los dispositivos y los servidores puede ser unidireccional o bidireccional, pero el estándar también admite la multidifusión. Esto resulta útil para tareas como actualizaciones de software inalámbricas o la distribución masiva de mensajes. En esencia, los Gateways funcionan como enrutadores equipados con concentradores LoRa, lo que les permite recibir y retransmitir paquetes de datos eficientemente [31].

Generalmente se encuentran dos tipos de Gateways; los Gateways con un firmware básico son más económicos y fáciles de usar. Funcionan como simples puertas de enlace para IoT, encargándose únicamente de reenviar los paquetes de datos sin realizar tareas adicionales. Por otro

lado, algunos Gateways más avanzados, como los modelos Kerlink IoT Station y Multitech Conduit, cuentan con un sistema operativo completo. Estos dispositivos no solo reenvían paquetes, sino que también ejecutan programas de manera automática en segundo plano para gestionar de manera más eficiente la comunicación de datos [32].

4) *Regulación del protocolo LoRaWAN.*

La LoRa Alliance es la entidad responsable de definir los estándares y directrices que rigen el desarrollo e implementación de la tecnología LoRaWAN. Su labor incluye la colaboración con organismos internacionales y autoridades regulatorias para garantizar el cumplimiento de normas relacionadas con el uso del espectro, los niveles de potencia de transmisión y las condiciones operativas de los dispositivos. Cabe resaltar que estas regulaciones no son uniformes: varían según el país y dependen de las disposiciones de las autoridades nacionales de telecomunicaciones, lo que exige adaptar cada despliegue de LoRaWAN a los marcos regulatorios locales [33], [34].

El protocolo LoRaWAN utiliza diferentes bandas de frecuencia en América y Europa, siguiendo las regulaciones locales y las directrices de LoRa Alliance, como se muestra en la Fig 5. En América, las bandas más comunes son 915 MHz y 868 MHz; por ejemplo, la banda US 915 es la utilizada en los Estados Unidos, mientras que en Europa predomina la banda de 868 MHz (EU 868). Estas bandas pueden variar según el país y las normativas locales. En Colombia, por ejemplo, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones ha adaptado la banda de 915 MHz para LoRaWAN. Para este estudio, se utilizan dispositivos configurados para operar en la banda AU 915, que es la destinada a Australia. LoRa Alliance se encarga de garantizar que los dispositivos LoRaWAN sean compatibles a nivel global, ofreciendo orientación sobre las bandas de frecuencia más adecuadas para su uso en distintas regiones [35], [36].

La banda AU 915 está dividida en varias sub-bandas, cada una diseñada para distribuir de manera eficiente el espectro de frecuencia y evitar interferencias entre diferentes sistemas y aplicaciones. Algunas de las sub-bandas más comunes incluyen:

- AU 915-928: Esta es la sub-banda principal utilizada para LoRaWAN en Australia, que abarca el rango completo de 915 MHz a 928 MHz. Es la más utilizada para desplegar dispositivos LoRaWAN en el país [36].

- AU 915-923: Esta sub-banda es algo más estrecha, cubriendo el rango de 915 MHz a 923 MHz, y también es bastante común en el uso de LoRaWAN [36].

La banda AU 915 cuenta con un total de 64 canales disponibles, estos canales están distribuidos en varias sub - bandas y se utilizan para permitir la comunicación eficiente de dispositivos LoRaWAN [36], la distribución de canales AU 915 se organiza de la siguiente forma:

- 8 canales FSK en la banda de 915.2 MHz a 927.8 MHz.
- 56 canales LoRa en la banda de 915.9 MHz a 927.5 MHz.

Los canales de mensaje descendente y ascendente están definidos según la especificación regional de LoRaWAN. En el caso de AU 915, los mensajes ascendentes abarcan de 916.8 MHz a 927.2 MHz, distribuidos del canal 0 al 63, con intervalos de 200 kHz, como se muestra en la Tabla II. Los mensajes ascendentes también se extienden de 915.9 MHz a 927.1 MHz, correspondientes a los canales del 64 al 71, con el mismo intervalo de 200 kHz como se muestra en la Tabla III. Por otro lado, los canales de mensaje descendente van desde 923.3 MHz hasta 927.5 MHz, cubriendo del canal 0 al 7, como se muestra en la Tabla IV, también con intervalos de 200 kHz. Esta distribución facilita la comunicación bidireccional entre los dispositivos y las estaciones base en la banda [37].

Tabla II.

Canales para comunicación de mensajes Uplink banda AU 915.

Sub-banda	Canal	Frecuencia (MHz)
Uplink 1	0	915.2
Uplink 2	1	915.4
Uplink 3	2	915.6
Uplink 4	3	915.8
Uplink 5	4	916.0
Uplink 6	5	916.2
Uplink 7	6	916.4
Uplink 8	7	916.6
...	...	...
Uplink 64	63	927.8

Nota: datos tomados de The Things Network [37].

Tabla III.

Canales adicionales para comunicación de mensajes Uplink banda AU 915.

Sub-banda	Canal	Frecuencia (MHz)
Uplink 1	64	915.9
Uplink 2	65	917.5
Uplink 3	66	919.1
Uplink 4	67	920.7
Uplink 5	68	922.3
Uplink 6	69	923.9
Uplink 7	70	925.5
Uplink 8	71	927.1

Nota: datos tomados de The Things Network [37].

Tabla IV.

Canales para comunicación de mensajes Downlink banda AU 915.

Sub-banda	Canal	Frecuencia (MHz)
Downlink 1	0	923.3
Downlink 2	1	923.9
Downlink 3	2	924.5
Downlink 4	3	925.1
Downlink 5	4	925.7
Downlink 6	5	926.3
Downlink 7	6	926.9
Downlink 8	7	927.5

Nota: datos tomados de The Things Network [37].

C. Arquitecturas de medición inteligente

Las arquitecturas de medición inteligente, como la Lectura Automática del Medidor o AMR y la Infraestructura de Medición Avanzada o AMI, son sistemas innovadores diseñados para gestionar de manera eficiente los datos de medición. Mientras que AMR se enfoca en automatizar la lectura de los medidores, permitiendo una gestión más efectiva de los datos, AMI va un paso más allá, incorporando tecnología avanzada que facilita la comunicación bidireccional entre los medidores y el centro de control. Esto permite una gestión más flexible y dinámica del suministro de energía. Ambos sistemas buscan mejorar la eficiencia operativa y elevar la calidad del servicio en las empresas de servicios públicos [38].

1) AMR.

La arquitectura de telemedición denominada AMR está diseñada para realizar lecturas automáticas de mediciones con mayor eficiencia, permitiendo el monitoreo remoto de datos y la gestión del consumo de manera eficaz. Sus funciones principales incluyen un sistema de gestión integral, manejo de datos, generación de reportes, un concentrador de información y un alto nivel de seguridad. Sus beneficios principales son la agilización del proceso de facturación, la reducción de los costos asociados a la lectura manual, la eliminación de estimaciones y consumos promedio, el acceso inmediato a información detallada sobre el consumo o el medidor, la rápida identificación de interrupciones en el servicio, así como la capacidad de proporcionar servicios avanzados como la identificación de perfiles de usuarios. En la Fig 9 se muestra la arquitectura AMR [39].

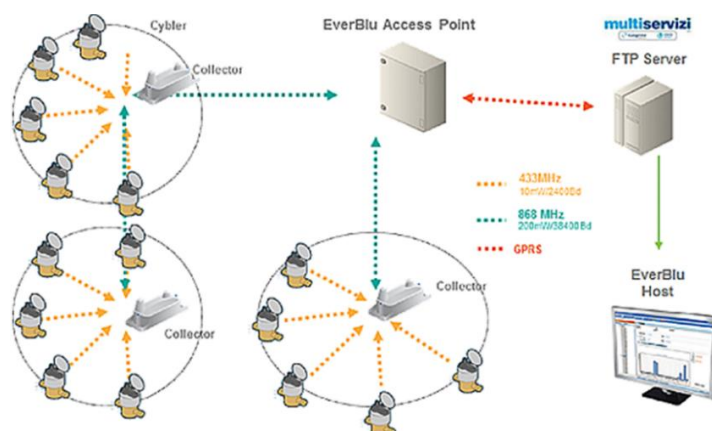


Fig 9. Arquitectura de medición avanzada AMR.

Fuente. ResearchGate [40].

2) AMI.

La arquitectura de telemedición denominada AMI integra componentes de hardware y software en torno a un medidor inteligente, junto con una infraestructura de comunicaciones integrada que facilita intercambios bidireccionales de información y registros en tiempo real [41]. Los elementos del sistema interactúan entre sí de forma fiable y eficiente para la interacción entre el usuario final y la empresa que comercializa. El sistema AMI está compuesto por los siguientes elementos: medidor inteligente, concentrador de datos, red de comunicaciones y sistema de gestión de la información. El medidor inteligente tiene la capacidad de recopilar datos de consumo y transmitirlos a los clientes participantes. Los sistemas de información proporcionan a la gerencia

información para la evaluación y toma de decisiones basadas en conocimientos; también gestionan el procesamiento, almacenamiento y distribución de información entre clientes [42]. En la Fig 10 se presenta la estructura de una arquitectura de Medición Avanzada del sistema AMI.

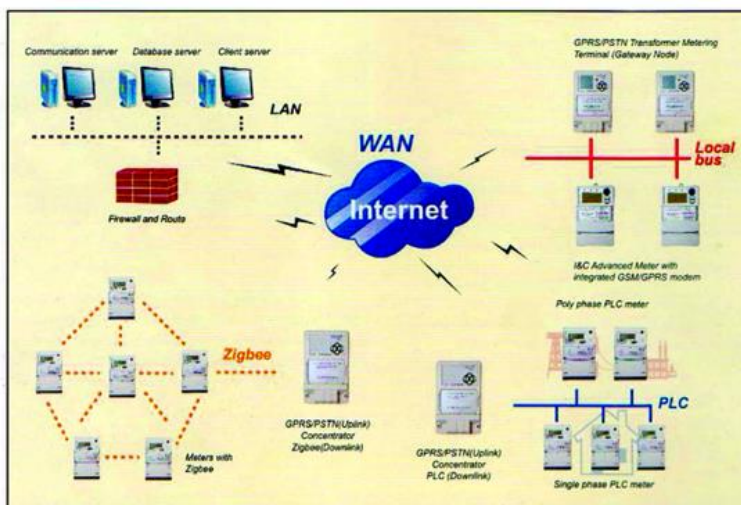


Fig 10. Arquitectura de medición avanzada AMI.

Fuente. Selda 1 [43].

D. Conceptos sobre comunicaciones por RF

En esta sección, se pretende conectar diferentes conceptos determinantes para desarrollar el trabajo. Se divide en dos partes: la primera se enfoca en conceptos relacionados con la radiofrecuencia (RF) y la segunda se centra en antenas para aplicaciones de IoT. La RF es una parte del espectro electromagnético, que abarca frecuencias desde 3 Hz hasta 300 GHz. Las ondas de RF se generan al pasar una corriente eléctrica a través de un conductor y luego se reciben mediante una antena. Un ejemplo familiar de esto es una estación de radio, que emite señales que son captadas por un receptor, como una radio común [44].

Para entender las comunicaciones por RF es importante comprender algunos conceptos básicos, los cuales se describen a continuación.

1) Potencia en RF.

La potencia en RF se refiere a la cantidad de energía electromagnética emitida por una fuente de radiofrecuencia, como una antena o un transmisor, en forma de ondas electromagnéticas. En el contexto de tecnologías inalámbricas como LoRaWAN, la potencia RF influye en el alcance

y la estabilidad de la comunicación, pero no afecta la calidad de los datos transmitidos. En LoRaWAN, la potencia RF se mide comúnmente en mW (miliwatios) o en dBm (decibelios-miliwatios). Su control es esencial para mejorar la eficiencia de la transmisión y garantizar el cumplimiento de las normativas establecidas por los organismos reguladores del espectro radioeléctrico [45].

2) Nivel de potencia.

El nivel de potencia en RF se refiere a la cantidad de energía electromagnética emitida por un dispositivo o una fuente de RF. En las comunicaciones inalámbricas, como LoRaWAN, esta potencia se expresa comúnmente en dBm o mW. El nivel de potencia RF es un factor esencial en la comunicación inalámbrica, ya que afecta el alcance de la señal, la estabilidad de la conexión y el consumo de energía. La abreviatura dB suele combinarse con otras para indicar el valor que se va a comparar, como se observa a continuación [46]:

- dBm: El valor de dB se compara con 1 mW.
- dBw: El valor de dB se compara con 1 W.

La potencia de dB se calcula con la siguiente ecuación (1) que se expresa como:

$$Power(in\ dB) = 10 * \log_{10} (Signal/Reference) \quad (1)$$

Donde:

- $\log_{10}$ es el logaritmo base 10.
- *Signal* es la intensidad de la señal (W).
- *Reference* es la intensidad de referencia (W).

En el RF existen algunas reglas que se usan para realizar análisis de forma rápida, como la relación entre dB y potencia. En la Tabla V se presenta una lista de reglas fundamentales [46].

Tabla V.
Reglas generales del nivel de potencia en RF.

	Produce:
Un aumento de:	
3 dB	Duplica la potencia
10 dB	Multiplica la potencia por 10
30 dB	Multiplica la potencia por 1000
Una disminución de:	
3 dB	Reduce la potencia a 1/10
10 dB	Reduce la potencia a la mitad
30 dB	Reduce la potencia a 1/1000

Nota: datos tomados de CISCO [46].

3) *EIRP.*

La EIRP o Potencia Isotrópica Radiada Efectiva es una medida teórica de la potencia radiada por una antena en una dirección específica, expresada como si la antena irradiara la misma cantidad de energía de manera uniforme en todas las direcciones, es decir, como una fuente isotrópica. Es importante destacar que la EIRP es una medida idealizada y teórica, ya que en la práctica las antenas no pueden irradiar de manera perfectamente uniforme en todas las direcciones. Para calcular el EIRP (Potencia isotrópica radiada efectiva), se suma la potencia del transmisor en dBm P_T a la ganancia de antena en dBi G_a . Y se resta la pérdida de cable en dB L_C , como se expresa en la siguiente ecuación (2) [46], [47].

$$EIRP = P_T - L_C + G_a \quad (2)$$

4) *Antenas en RF.*

Las antenas de RF son dispositivos diseñados para transmitir y recibir ondas electromagnéticas dentro de un rango específico de frecuencias de radio. Estas ondas permiten la comunicación inalámbrica en diversas aplicaciones, como telecomunicaciones, radio, televisión, telefonía móvil, radar y otros sistemas de transmisión de datos. Estas antenas abarcan un amplio rango de frecuencias, desde niveles muy bajos hasta los 18 GHz, lo que permite su uso en diversas tecnologías como navegación, redes móviles, Bluetooth y otras aplicaciones inalámbricas. Su función principal es convertir señales eléctricas en ondas electromagnéticas que se propagan por

el espacio y, a su vez, recibir estas ondas para transformarlas nuevamente en señales eléctricas [48].

El tamaño y la forma de una antena varían según la frecuencia de operación, el alcance requerido y las condiciones del entorno en el que se utilizará, garantizando un rendimiento óptimo en cada aplicación [48].

Tipos de antenas según su fabricación: Además de captar y emitir energía electromagnética, en algunas situaciones la antena debe mejorar la radiación o recepción en direcciones específicas, mientras atenúa o bloquea señales provenientes de otras direcciones. Las antenas se clasifican de manera general en dos grupos [48]:

- Antenas de hilo: dipolo, monopolo, espiral, circular o cuadrada y hélice.
- Antenas de apertura: bocina, piramidal, impresas o microtiras.

Dentro de la clasificación general de antenas, según el patrón de radiación las tres más comunes en radiofrecuencia son:

- Antena isotrópica: una antena que irradia con igual intensidad en todas las direcciones del espacio y sirve como punto de referencia [48].
- Antena direccional: una antena que concentra la radiación en una sola dirección; ejemplos incluyen cornetas, reflectores, yagi y logarítmicas [48].
- Antena omnidireccional: una antena que irradia de manera uniforme en un plano; ejemplos incluyen monopolos y dipolos [48].

Ganancia de la antena: Las antenas de radiocomunicaciones cuentan con características propias, pero todas tienen aspectos en común que les permiten realizar su función. La ganancia de una antena se refiere a su capacidad para concentrar la energía radiada en una dirección específica. Es la habilidad de la antena para dirigir eficientemente la energía de la señal transmitida hacia un punto particular en el espacio [48].

SWR: La relación de onda estacionaria o SWR se utiliza para medir el rendimiento de una antena. El SWR de 1:1 indica una adaptación perfecta de la antena, sin pérdida de potencia reflejada. Por otro lado, una relación de SWR de $1:\infty$ señala que la antena no absorbe energía, reflejando toda la potencia del transmisor de vuelta hacia éste [49].

E. Antenas en IoT

La implementación de antenas en aplicaciones de IoT es fundamental para garantizar una conectividad inalámbrica eficiente y confiable. Estas antenas son esenciales para la transmisión y recepción de datos entre dispositivos, asegurando una comunicación continua y de alta calidad en redes IoT. Su diseño y ubicación adecuada pueden influir significativamente en el rendimiento de la red y en la cobertura, optimizando así la eficiencia de las aplicaciones conectadas [50]. A continuación, se enumeran las opciones más comunes:

Se deben de considerar varios parámetros como Frecuencia de Operación, Ganancia, Directividad, Tamaño y Forma, Eficiencia, EMC (Compatibilidad Electromagnética) y Ambiente de Operación [50].

- Antenas dipolo: estas antenas son simples y económicas, ampliamente utilizadas en dispositivos IoT debido a su fácil fabricación y bajo costo. Son omnidireccionales, lo que significa que emiten y reciben señales en todas las direcciones de manera equitativa [50].



Fig 11. Antena Dipolo.

Fuente. Habitissimo [51].

- Antenas PCB: impresas en placas de circuito impreso, estas antenas son compactas y pueden integrarse directamente en el diseño del dispositivo IoT, lo que las hace muy populares para aplicaciones con restricciones de espacio [50].

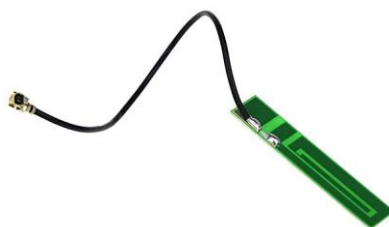


Fig 12. Antena PCB.

Fuente. Sigma Electrónica [52].

- Antenas de parche: son antenas direccionales que ofrecen un rendimiento superior en términos de ganancia y alcance en una dirección específica. Son útiles cuando se requiere una cobertura más enfocada en una dirección particular [50].

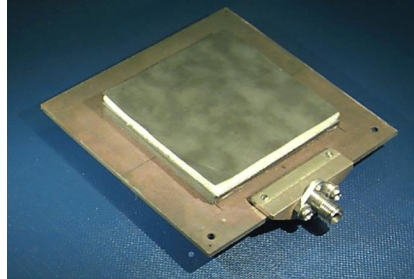


Fig 13. Antena de parche.

Fuente. ResearchGate [53].

- Antenas de fibra de vidrio: robustas y resistentes a condiciones ambientales adversas, estas antenas son adecuadas para aplicaciones en exteriores o entornos industriales [50].



Fig 14. Antena de fibra de vidrio.

Fuente. F&S [54].

- Antenas de dipolo plegado: una variación de los dipolos estándar que ofrecen un mejor rendimiento en términos de ganancia y directividad [50].

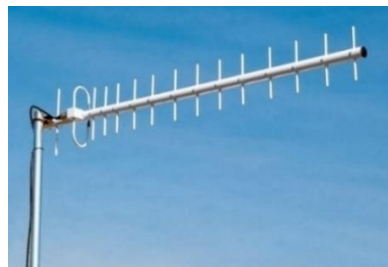


Fig 15. Antena de dipolo plegado.

Fuente. Syscom Blog [55].

F. Parámetros de desempeño de la red LoRaWAN

En esta sección se presentan y describen los principales parámetros que determinan el desempeño de una red LoRaWAN, fundamentales para comprender el comportamiento de la comunicación inalámbrica entre los módulos IoT y el Gateway. La caracterización de estos parámetros permite establecer criterios técnicos sólidos que facilitan el análisis, la planificación y la optimización de la red en distintos entornos de aplicación. Se inicia con la definición del RSSI, seguidamente se aborda el SNR, en tercer lugar, se analiza el SF, por último, se examina el DR. Dichos parámetros se definen a continuación.

1) RSSI.

RSSI o indicador de fuerza de la señal recibida es una medida relativa que determina si la señal recibida es lo suficientemente fuerte como para tener una buena conexión inalámbrica desde el transmisor. En redes LoRaWAN, donde existe comunicación bidireccional, el RSSI es un parámetro crucial tanto para los Gateways como para los nodos finales. Este indicador, expresado en dBm con valores negativos, se interpreta mejor cuando se aproxima a cero, ya que indica una señal más fuerte. Los siguientes factores, excepto la potencia de salida del transmisor, influyen principalmente en RSSI [56].

- Path loss (Pérdida de trayectoria).
- Ganancia de la antena.
- Cable/connector loss (Perdida de conector).
- La potencia definida por la electrónica del módulo de comunicación específicamente la etapa de amplificación en transmisión.

2) SNR.

SNR o relación señal-ruido es la relación entre la potencia de la señal recibida y el ruido de fondo. Se emplea comúnmente para determinar la calidad de la señal que se recibe [56]. Se expresa a menudo en decibelios (dB), su valor se calcula con la siguiente ecuación (3):

$$SNR(dB) = P_{señal_{recibida}}(dBm) - P_{ruido}(dBm) \quad (3)$$

Cuando el RSSI supera el nivel de ruido de fondo, el receptor puede demodular la señal con facilidad [56]. Este concepto se muestra en la gráfica de la Fig 16 donde se presenta un ejemplo de una SNR positivo:

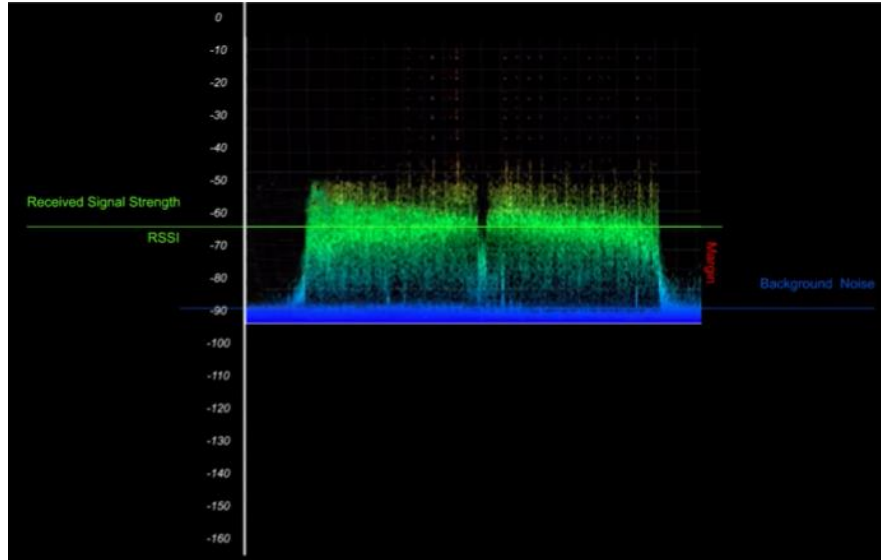


Fig 16. SNR positivo.

Fuente. Imagen capturada del video de YouTube de Richard Wenner, el eje X es nivel de potencia en dBm y el eje Y es tiempo [56].

Al analizar el gráfico de la Fig 16, se observa que el valor de RSSI es cercano a -65 dBm, mientras que el nivel de ruido de fondo es aproximadamente de -90 dBm. Con estos datos, podemos calcular el SNR utilizando la siguiente ecuación (3):

$$SNR(dB) = P_{señal_recibida}(dBm) - P_{ruido}(dBm) \quad (3)$$

$$SNR(dB) = -65 \text{ dBm} - (-90 \text{ dBm})$$

$$SNR(dB) = 25 \text{ dB}$$

Un valor positivo de SNR indica que la señal es más intensa que el nivel de ruido, lo cual facilita que el receptor pueda demodular y procesar adecuadamente la información transmitida [56].

Si el RSSI se encuentra por debajo del nivel de ruido de fondo, la demodulación de la señal no es posible. Sin embargo, la tecnología LoRa es capaz de demodular señales incluso cuando están por debajo del umbral de ruido. El SNR mínimo necesario para la demodulación varía según el factor de dispersión, como se muestra en la Tabla VI [56].

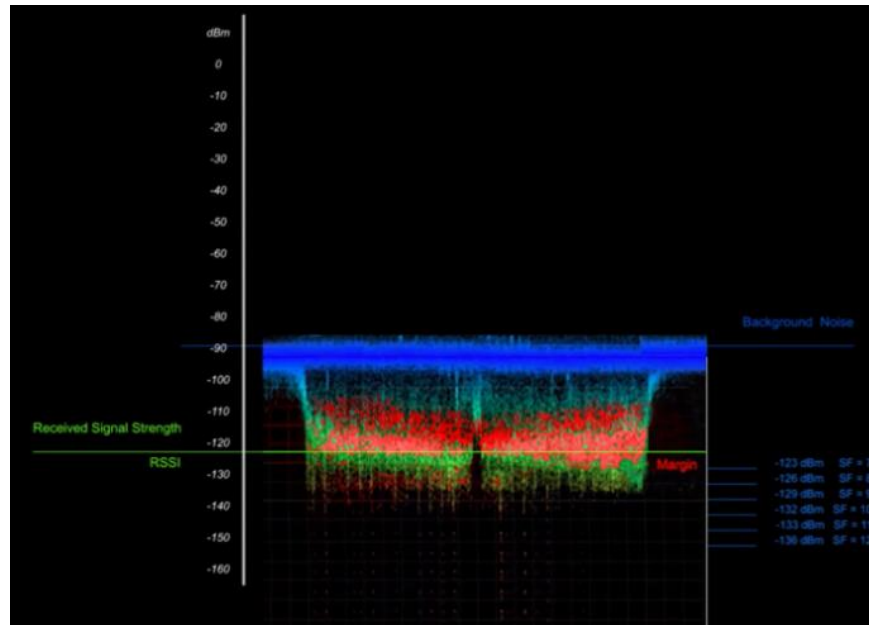
Tabla VI.

SNR requerido para la demodulación en diferentes factores de dispersión.

Spreading Factor (RegModulationCfg)	Spreading Factor (Chips/symbol)	LoRa Demodulator SNR
6	64	-5 dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

Nota: datos tomados de Semtech [56].

La gráfica de la Fig 17 muestra un ejemplo de un SNR negativo.

**Fig 17.** SNR negativo.

Fuente. Imagen capturada del video de YouTube de Richard Wenner, el eje X es nivel de potencia en dBm y el eje Y es tiempo [56].

En la gráfica de la Fig 17, se puede ver que el RSSI es aproximadamente -120 dBm y el ruido de fondo aproximadamente -90 dBm. Se calcula el SNR con la siguiente ecuación (3):

$$SNR(dB) = P_{señal_recibida}(dBm) - P_{ruido}(dBm) \quad (3)$$

$$SNR(dB) = -120 \text{ dBm} - (-90 \text{ dBm})$$

$$SNR(dB) = -30 \text{ dB}$$

El SNR negativo significa que la potencia de la señal es menor que la potencia del ruido. El valor de -30 dB está debajo de la SNR mínima de -20 dB, como se observa en la Tabla VI, por lo tanto, esto no garantiza que el receptor pueda demodular la señal [56].

3) *SF*.

Uno de los parámetros más importantes que afectan el rendimiento de la capa física es el factor de dispersión o SF. Manteniendo el ancho de banda constante, la sensibilidad del receptor puede incrementarse aumentando el tiempo aire (la duración de la transmisión de un paquete). Más precisamente, cada aumento de unidad en SF (de un mínimo de 7 a un máximo de 12 en LoRa) corresponde a una duplicación del tiempo aire y una disminución en la sensibilidad del receptor de alrededor de 3 dB como se muestra en la Tabla VII [57], [58].

Tabla VII.

Relación entre SF y sensibilidad.

SF	Tasa de bits equivalentes (kb/s)	Sensibilidad (dBm)
12	0.293	-137
11	0.537	-134,5
10	0.976	-132
9	1.757	-129
8	3.125	-126
7	5.468	-123

Nota: datos tomados de Semtech [57].

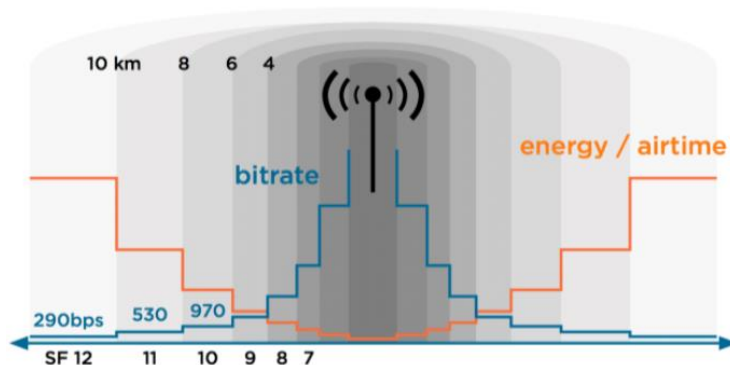


Fig 18. Valores de SF de la red LoRa.

Fuente. ResearchGate [59].

Considerando que las diversas combinaciones de SF y ancho de banda de la señal generan velocidades de datos distintas, se emplea el ADR. Esto implica que los nodos LoRa ubicados más lejos del Gateway deben usar un SF más alto, lo que resulta en una velocidad de datos más baja y un tiempo de transmisión más prolongado. Esta estrategia aumenta la inmunidad de la señal a las interferencias. Por otro lado, los nodos LoRa más cercanos al Gateway pueden utilizar un SF más bajo, lo que aumenta su velocidad de datos y reduce el tiempo de transmisión, reduciendo así el consumo de energía, tal como se muestra en la Fig 18. Estas características posibilitan la construcción de redes utilizando estructuras múltiples o en estrella sin necesidad de routers ni repetidores, lo que simplifica su gestión [59], [60].

4) *DR.*

DR o tasa de datos, en redes LoRaWAN el DR se refiere a la velocidad efectiva de transmisión de información entre un nodo final y el Gateway. Este parámetro está determinado por la combinación del SF y el ancho de banda (BW) utilizados durante la modulación LoRa [61]. Su valor influye directamente en el rendimiento del enlace, afectando la cobertura, el consumo energético y la robustez de la comunicación [62].

Una tasa de datos baja (DR bajo) implica una velocidad de transmisión reducida, pero proporciona mayor sensibilidad del receptor y mejor alcance, lo que resulta adecuado para entornos con alta atenuación o largas distancias [3]. Por el contrario, una tasa de datos alta (DR alto) permite transmisiones más rápidas y eficientes, pero requiere mejores condiciones de canal, ya que presenta menor tolerancia al ruido y menor alcance [61], [63].

Por tanto, el DR constituye un parámetro crítico de desempeño que debe ser seleccionado en función del entorno de despliegue, la distancia entre dispositivos y los requerimientos energéticos de la aplicación [62].

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Para el desarrollo de la investigación se implementó la metodología en cascada, la cual resalta por su enfoque secuencial y estructurado a través de fases previamente definidas [64]. Este modelo facilita un abordaje ordenado del análisis de desempeño de la tecnología LoRaWAN, permitiendo una adecuada planificación, ejecución y validación de los escenarios de prueba.

La metodología en cascada se compone de cuatro fases que se realizarán de forma progresiva, donde cada etapa depende del resultado de la anterior, lo que asegura un proceso riguroso y sistemático, obteniendo así reproducibilidad. En esta investigación, la aplicación de esta metodología se detalla a través de las distintas fases que se muestran en la Fig 19.

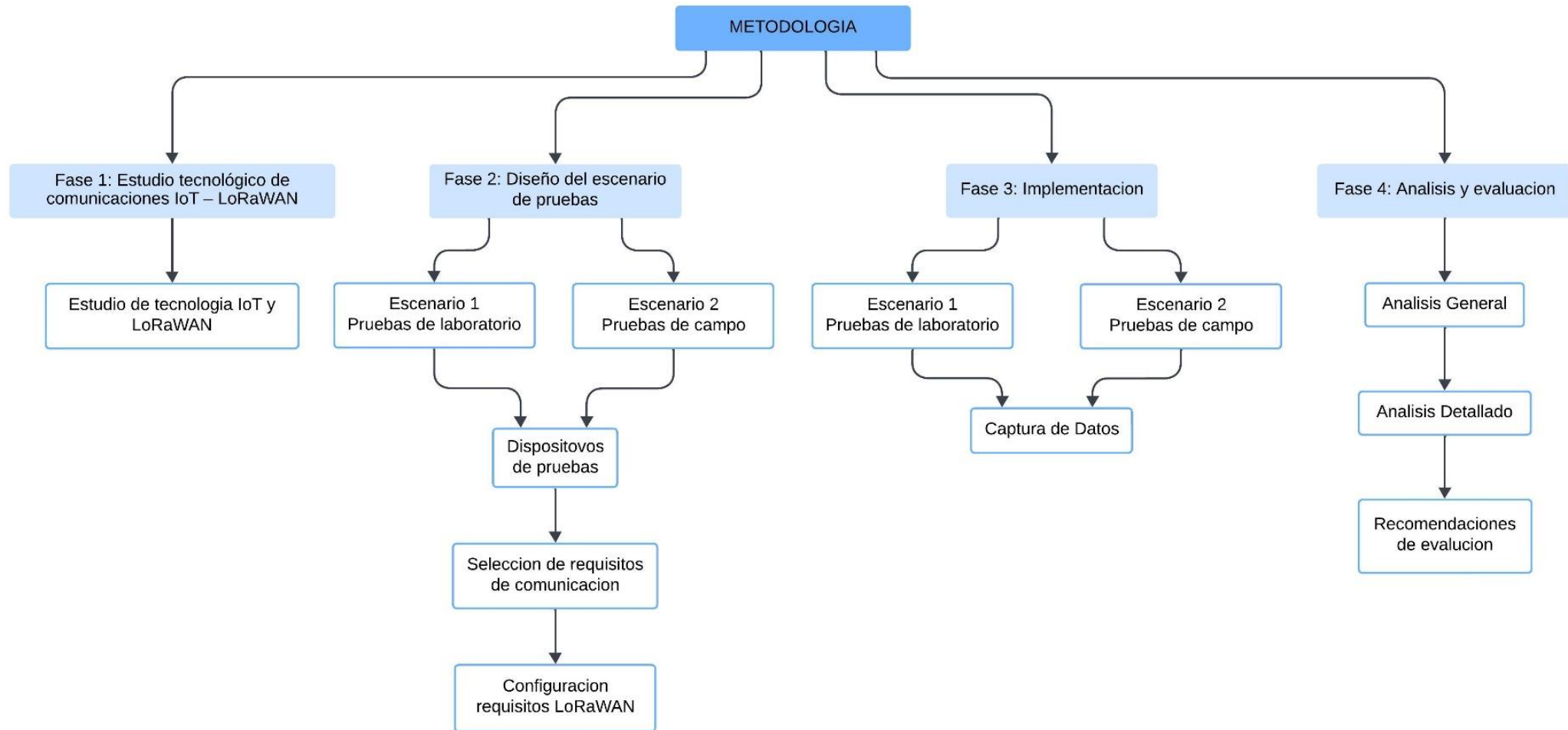


Fig 19. Diagrama de metodología de la investigación.

Fase 1: Estudio tecnológico de comunicaciones IoT – LoRaWAN.

Estudio de tecnología IoT y LoRaWAN: Se realiza un estudio sobre la tecnología IoT y LoRaWAN.

Fase 2: Diseño del escenario de prueba.

Se establecen dos escenarios de prueba:

- **Escenario de prueba No. 1:** Este escenario fue diseñado con el propósito de evaluar el efecto de la orientación física del módulo IoT respecto al Gateway sobre la calidad del enlace de comunicación. Para ello, se definieron tres zonas de distancia entre el módulo IoT y el Gateway, se aplicaron configuraciones técnicas específicas con valores intermedios y estables de los parámetros de comunicación SF y DR. Esta selección permitió aislar el impacto de la orientación física en parámetros fundamentales como RSSI y SNR, evitando que variaciones extremas de modulación influyeran en la evaluación. Técnicamente, los valores intermedios de SF y DR proporcionan un equilibrio entre alcance, sensibilidad del receptor y consumo energético, lo que resulta ideal para un entorno de prueba enfocado en observar la influencia de la orientación.
- **Escenario de prueba No. 2:** En este escenario se utilizó la orientación del módulo IoT que presentó el mejor desempeño en el escenario de prueba No. 1. Se mantuvieron las mismas zonas de distancia del escenario de prueba No. 1, pero se implementaron combinaciones de SF y DR más exigentes, con el fin de evaluar la calidad del enlace bajo condiciones más representativas de un entorno real. En términos técnicos, se utilizaron valores altos de SF como SF 9 y SF 10, que ofrecen mayor robustez de modulación y mayor sensibilidad del receptor, a costa de una mayor duración en el tiempo de aire y un menor DR. Paralelamente, se emplearon valores críticos de DR como DR 4 a DR 7 para explorar cómo estas combinaciones afectan la estabilidad, cobertura y eficiencia energética del sistema en escenarios con interferencias o atenuación variable.

En ambos escenarios se aplicaron los siguientes lineamientos:

- Dispositivos de escenarios de prueba: Se identifican los dispositivos de prueba que serán utilizados como lo son el servidor de red, Gateway y módulo IoT.

- Selección de requisitos de comunicación: Se seleccionan los requisitos de comunicación necesarios para el proceso de comunicación como lo son SF, DR, SNR y RSSI.
- Configuración de requisitos LoRaWAN: Se configura el sistema con los requisitos LoRaWAN.

Fase 3: Implementación.

- **Escenario de prueba No. 1:** se posicionó el módulo IoT en tres orientaciones (Orientación #1: de frente, Orientación #2: de espaldas y Orientación #3: hacia abajo), ubicado en tres rangos de distancia predeterminados respecto al Gateway. En este escenario de prueba, se mantuvieron constantes los parámetros de SF y DR con configuraciones de mayor sensibilidad, con el objetivo de analizar exclusivamente el efecto de la orientación física del módulo IoT sobre el desempeño del enlace, medido mediante RSSI y SNR. Para cada orientación, se tomaron 30 datos, con un intervalo de 10 minutos entre cada medición, lo que permitió una recopilación representativa y temporalmente distribuida de las condiciones de señal.
- **Escenario de prueba No. 2:** implementando la orientación del módulo IoT que presentó el mejor rendimiento en el escenario de prueba No. 1, se utilizaron las mismas tres zonas de distancia del escenario de prueba No. 1. A diferencia del escenario anterior, en este escenario de prueba No. 2 se implementaron múltiples combinaciones de SF y DR consideradas operativamente exigentes, con el propósito de evaluar la estabilidad, cobertura y eficiencia energética de la red bajo condiciones reales. Para cada variación de DR, se tomaron también 30 datos con una periodicidad de 10 minutos entre cada muestra, garantizando así consistencia en el proceso de recolección y permitiendo el análisis comparativo entre configuraciones.

Fase 4: Análisis y evaluación.

- Se lleva a cabo un análisis general descriptivo de los resultados, utilizando herramientas estadísticas como la media, mediana, varianza y desviación estándar para evaluar tendencias y variaciones en los datos recopilados. Se utilizarán herramientas estadísticas descriptivas, como la media y la desviación estándar, para analizar cómo se comportan las variables en cada uno de los escenarios evaluados.

- Se realiza un análisis detallado de los datos obtenidos, empleando técnicas para modelar la relación entre los parámetros de comunicación y el desempeño de la red.
- Se formulan recomendaciones de evaluación en función de los hallazgos.

A continuación, en las siguientes secciones se desarrollará con más detalle cada una de las fases de la metodología y así, ir dando cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados.

A. Fase 1: Estudio tecnológico de comunicaciones IoT – LoRaWAN.

El análisis de la tecnología LoRaWAN, junto con otras tecnologías de comunicación aplicadas al IoT, se realizó en el CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO. En dicho capítulo se presentaron de manera detallada la definición, el funcionamiento y las características técnicas de cada una de estas tecnologías, lo que permitió construir una base conceptual sólida para su comprensión. La tecnología LoRaWAN fue abordada considerando su arquitectura, esquema de modulación, cobertura, eficiencia energética, principales limitaciones y sus parámetros de desempeño. Así mismo, se incluyeron tecnologías como NB-IoT, Sigfox, Wi-Fi y BLE, cuyas propiedades técnicas, ventajas y restricciones fueron comparadas para identificar sus posibles aplicaciones en diferentes escenarios.

Este estudio teórico permitió identificar los factores importantes que afectaron la transmisión de datos en redes IoT y proporcionó los fundamentos necesarios para establecer los requisitos de comunicación que guiaron el desarrollo de la Fase 2: Diseño de escenarios de prueba. La Tabla VIII resume los principales aspectos de cada tecnología.

Tabla VIII.

Cuadro resumen del Capítulo II: Marco Teórico.

Capítulo II: Marco Teórico	
Apartado	Descripción
Tecnologías de comunicación IoT	En el apartado A. Se analizaron las redes de comunicación IoT, esenciales para la conexión de dispositivos y sensores en la automatización y el monitoreo en tiempo real. Estas redes permitieron la transmisión eficiente de datos con bajo consumo energético y amplio alcance; las tecnologías de largo alcance como LoRaWAN, Sigfox y NB-IoT facilitaron la conectividad en entornos urbanos y rurales sin infraestructura costosa, siendo fundamentales en la gestión de servicios públicos, monitoreo ambiental y control de activos. Mientras tanto, las redes de corto alcance como BLE, ZigBee y Wi-Fi destacaron en aplicaciones domésticas e industriales, priorizando velocidad o eficiencia energética; las redes LPWAN

	están pensadas para enviar datos a larga distancia sin comprometer significativamente la duración de la batería en los dispositivos conectados. SigFox operó con bandas de frecuencia estrechas para mejorar la cobertura, NB-IoT ofreció conectividad confiable con ancho de banda reducido y LoRa, con su modulación chirp, garantizó alta tolerancia a interferencias y comunicación eficiente en entornos descentralizados. Estas tecnologías impactaron positivamente en múltiples sectores, optimizando procesos, mejorando la eficiencia operativa y facilitando la toma de decisiones basada en datos en tiempo real.
LoRaWAN	En el apartado B. Se estudió LoRaWAN como una tecnología inalámbrica de bajo consumo y transmisión bidireccional para IoT, destacando su largo alcance, seguridad y eficiencia energética. Se analizó su arquitectura, donde los nodos finales se comunican con los Gateways, que envían la información al servidor de red para autenticación, enrutamiento y seguridad. Se diferenciaron LoRaWAN en la Capa de Red y LoRa en la Capa Física del modelo OSI. Se describieron los mensajes Uplink y Downlink, así como los nodos de Clase A, B y C según su consumo y disponibilidad. Además, se estudiaron los Gateways, diferenciando los básicos de los avanzados. Finalmente, se abordó la regulación de LoRaWAN por LoRa Alliance y la distribución de frecuencias a nivel global.
Arquitecturas de medición inteligente	En el apartado C. Se estudian las tecnologías de medición inteligente, enfocadas en la gestión eficiente del consumo de energía y otros servicios: • AMR: Se estudió su capacidad para recopilar datos de manera remota sin intervención humana, optimizando procesos como la facturación y la detección de anomalías. • AMI: Se evaluó su funcionalidad, que incorpora comunicación bidireccional, permitiendo el control remoto, el análisis de datos en tiempo real y una gestión más eficiente del consumo de recursos
Conceptos de comunicación por RF	En el apartado D. Se estudiaron los principios de RF aplicados a IoT, abordando la transmisión y recepción de señales mediante antenas. Se explicaron aspectos como: • Potencia de señal: su influencia en el alcance y la estabilidad de la comunicación. • EIRP: su determinación de la potencia radiada en una dirección específica. • Tipos de antenas: su clasificación en isotrópicas, direccionales y omnidireccionales, según la propagación de la señal y su aplicación en IoT.
Antenas en IoT	En el apartado E. Las antenas desempeñaron un papel fundamental en IoT, asegurando una conectividad inalámbrica eficiente. Su diseño y ubicación mejoraron la cobertura y el rendimiento de la red, tomando en cuenta parámetros como frecuencia, ganancia y directividad. Entre las más utilizadas se encontraron: • Dipolo: económicas y omnidireccionales.

	• PCB: compactas e integradas en circuitos impresos. • Parche: direccionales, con alta ganancia y alcance. • Fibra de vidrio: resistentes para exteriores e industrias. • Dipolo plegado: con mejor ganancia y directividad.
Parámetros de desempeño de la red LoRaWAN	En el apartado F. se presentó la definición teórica de los principales parámetros de desempeño asociados a redes LoRaWAN, con el propósito de establecer una base conceptual sólida que sirviera de fundamento para los análisis posteriores. Se abordaron de manera detallada el RSSI, el SNR, el SF y el DR, explicando su funcionamiento, importancia técnica e impacto en la calidad del enlace y la eficiencia de la comunicación. Estos conceptos se desarrollaron desde una perspectiva técnica, sin que ello implicara aún su aplicación práctica, la cual fue tratada en secciones posteriores del informe.

B. Fase 2: Diseño del escenario de prueba.

En esta fase se diseñaron dos escenarios de prueba con el propósito de evaluar el desempeño de la red LoRaWAN bajo diferentes condiciones operativas. El escenario de prueba No. 1 tiene como objetivo analizar el efecto de la orientación física del módulo IoT respecto al Gateway sobre la calidad del enlace, aplicando configuraciones estables con valores intermedios de SF y DR en tres zonas definidas por distintos rangos de distancia. En el escenario de prueba No. 2, se empleó la orientación que mostró mejor desempeño en el escenario de prueba No. 1, manteniendo las mismas zonas de distancia, pero incorporando combinaciones más exigentes de SF y DR, con el fin de validar la robustez, cobertura y eficiencia del sistema en condiciones reales.

Ambos escenarios utilizaron la misma topología de red LoRaWAN, compuesta por un módulo IoT, un Gateway y un Servidor de Red, conectados mediante enlaces LoRa. En cada caso, se identificaron los dispositivos de prueba, se seleccionaron los parámetros principales de comunicación como SF, DR, RSSI y SNR, se configuró el sistema de acuerdo con los requisitos técnicos de la red LoRaWAN.

1) Escenario de Prueba No. 1.

Este escenario fue diseñado con el objetivo de analizar cómo influye la orientación física del módulo IoT respecto al Gateway sobre la calidad del enlace de comunicación, considerando tres zonas de distancia definidas. Para ello, se utilizaron configuraciones técnicas con parámetros de comunicación estables valores intermedios de SF y DR, permitiendo analizar el impacto de la orientación sobre parámetros como RSSI y SNR, bajo condiciones parcialmente controladas, lo

cual permitirá ajustar parámetros de comunicación antes de su aplicación en el escenario de prueba No. 2.

En este escenario de prueba No. 1 se realizó utilizando la topología de red presentada en la Fig 20, la cual está compuesta por un servidor de red (Network Server), un Gateway UG65 y un módulo IoT DGML, los cuales se conectarán mediante enlaces de comunicación utilizando el protocolo LoRaWAN.

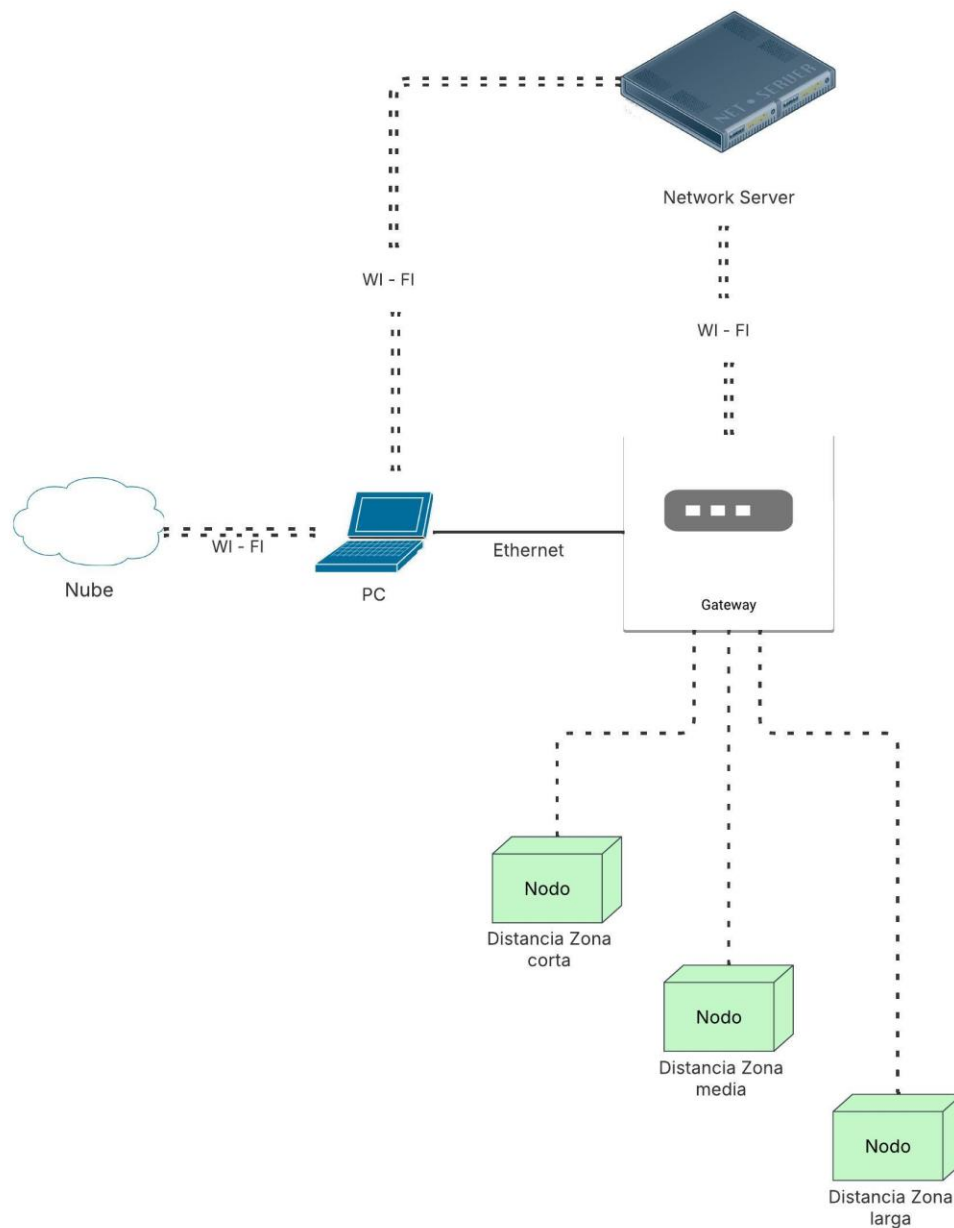


Fig 20. Topografía de red de los escenarios de prueba No. 1 y No. 2.

Dispositivos de prueba: Para el desarrollo del escenario de prueba No. 1, se seleccionaron los siguientes dispositivos los cuales fueron seleccionados por su robustez, compatibilidad, eficiencia energética y adaptabilidad a distintos entornos, donde cada uno con funcionalidades específicas que permitieron garantizar una comunicación efectiva y confiable en la red LoRaWAN:

- Network Server (ChirpStack): Plataforma open source encargada de gestionar la red LoRaWAN. Administra la autenticación, el cifrado, la asignación de direcciones y el enrutamiento de mensajes entre los dispositivos IoT y el Servidor de Aplicaciones. Su diseño modular permite adaptaciones específicas para cada entorno de prueba [65], interfaz mostrada a continuación:

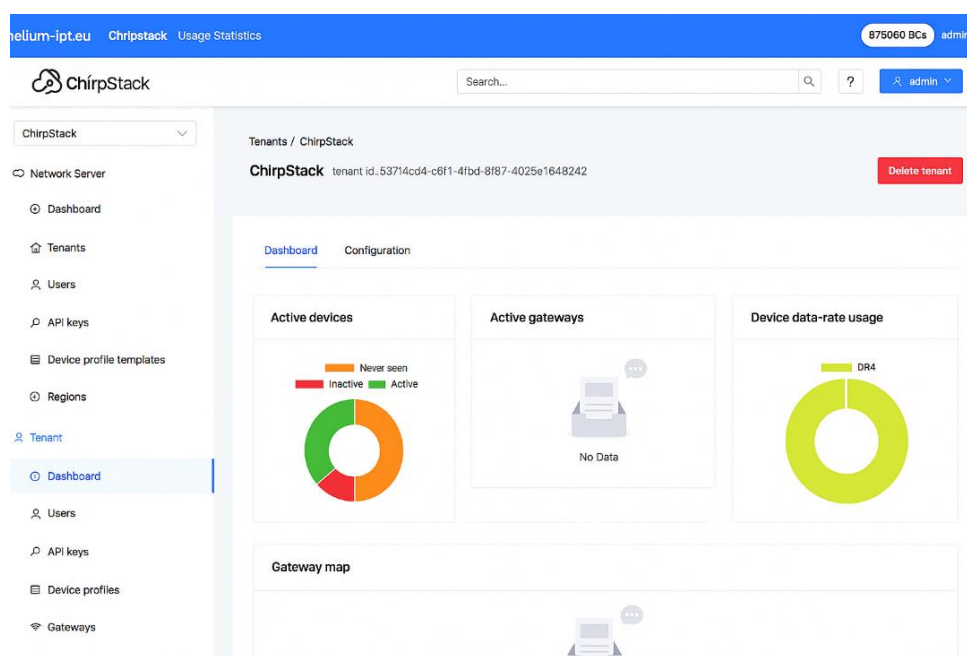


Fig 21. Interfaz del servidor de red ChirpStack.

Fuente. The IoT blog [65].

- Gateway (Milesight UG65): dispositivo con 8 canales, equipado con el chip Semtech SX1302 y una CPU de 64 bits. El cual es el intermediario entre el módulo IoT y el servidor, soportando hasta 2000 conexiones simultáneas. Ofrece cobertura de hasta 2 km en zonas urbanas y hasta 12 km² en áreas abiertas. Su compatibilidad con plataformas como ChirpStack, TTN y Lora, lo hacen ideal para escenarios urbanos e industriales [66], mostrado a continuación:



Fig 22. Gateway Milesight UG67.

Fuente. Powertec Telecommunications [66].

- Módulo IoT (DGML): Nodo de bajo consumo diseñado para aplicaciones de telemetría y monitoreo urbano. Integra comunicación LoRaWAN y modos de transmisión síncronos de envío programado cada 12 h y asíncronos por sensor magnético. Permite simular comportamientos reales en campo, asegurando eficiencia energética y estabilidad de enlace [67], mostrado a continuación:



Fig 23. Modulo IoT DGML.

Fuente. IoT Tech Solutions S.A.S. [67].

- PC Local: Se empleó para la configuración del Gateway y del servidor ChirpStack, así como para el monitoreo y control en tiempo real del escenario de prueba No. 1.
- Nube (Servidor de Aplicaciones): Plataforma del servidor ChirpStack en la que se almacenan y visualizan los datos recolectados, permitiendo acceso remoto, análisis posterior y trazabilidad del desempeño de la red.

Selección de requisitos de comunicación: Se definieron los siguientes parámetros de comunicación, los cuales influyen directamente en el comportamiento del enlace y la calidad de la transmisión en la red LoRaWAN:

- RSSI.
- SNR.
- SF.
- DR.
- Ubicación de las mediciones: La Fig 24 presenta la disposición del módulo IoT en las diferentes orientaciones evaluadas con respecto al Gateway, aspecto fundamental para analizar el impacto de la orientación sobre la calidad del enlace. Las mediciones de desempeño se llevaron a cabo en tres zonas de prueba, determinadas por la distancia entre el módulo IoT y el Gateway, las cuales se ilustran en las Fig 25, Fig 26 y Fig 27. Estas ubicaciones permitieron evaluar el comportamiento del enlace en diferentes condiciones de cobertura, desde entornos cercanos con alta intensidad de señal hasta zonas más alejadas con mayor atenuación y presencia de interferencias ambientales.

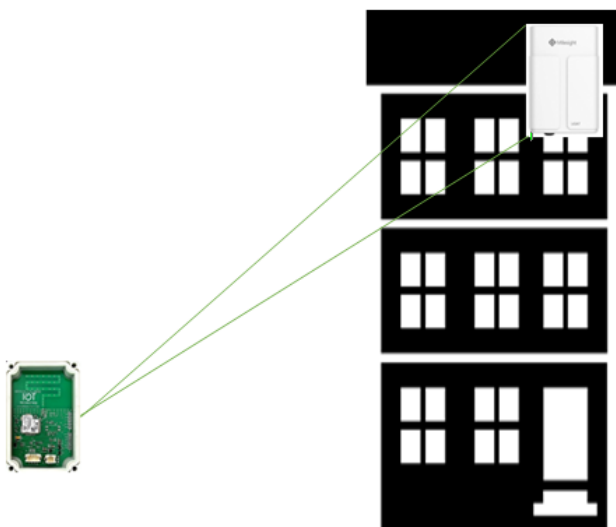


Fig 24. Posición del módulo IoT respecto al Gateway.

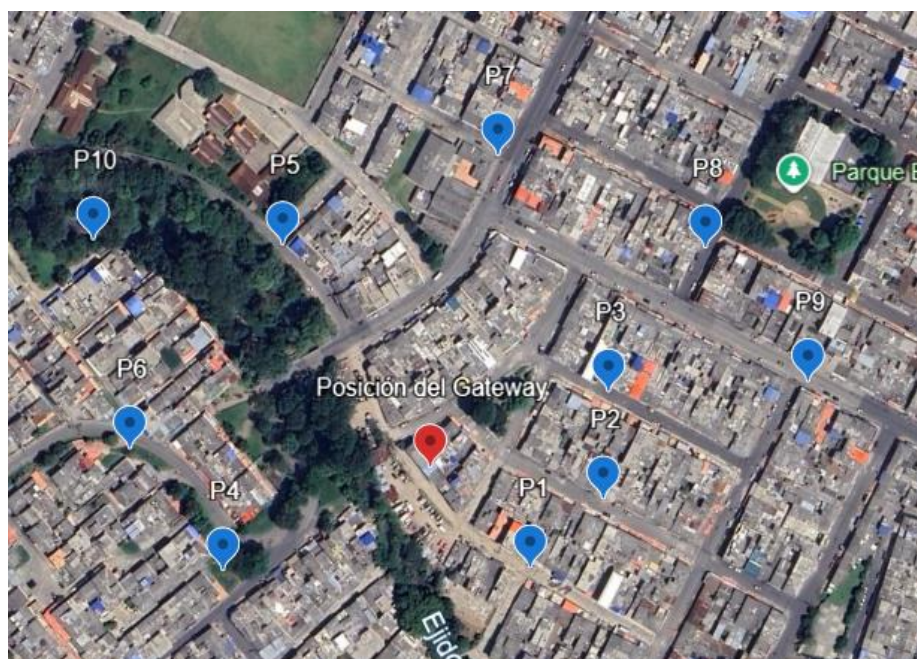


Fig 25. Zona de distancia de medición de toma de datos corta (80 - 215) m.

Fuente. Google Earth [68].



Fig 26. Zona de distancia de medición de toma de datos media (250-490) m.

Fuente. Google Earth [68].



Fig 27. Zona de distancia de medición de toma de datos larga (500 - 590) m.

Fuente. Google Earth [68].

Configuración de requisitos LoRaWAN: La red fue configurada conforme a los parámetros establecidos por la especificación LoRaWAN y adaptada a las necesidades del protocolo de escenario de prueba No. 1. La configuración incluyó:

- Banda de Frecuencia.
- Identificadores de red, identificados en la Fig 28.
- Tipo de Red.
- Topología: Módulo IoT – Gateway – Network Server – Nube.
- PC de monitoreo.

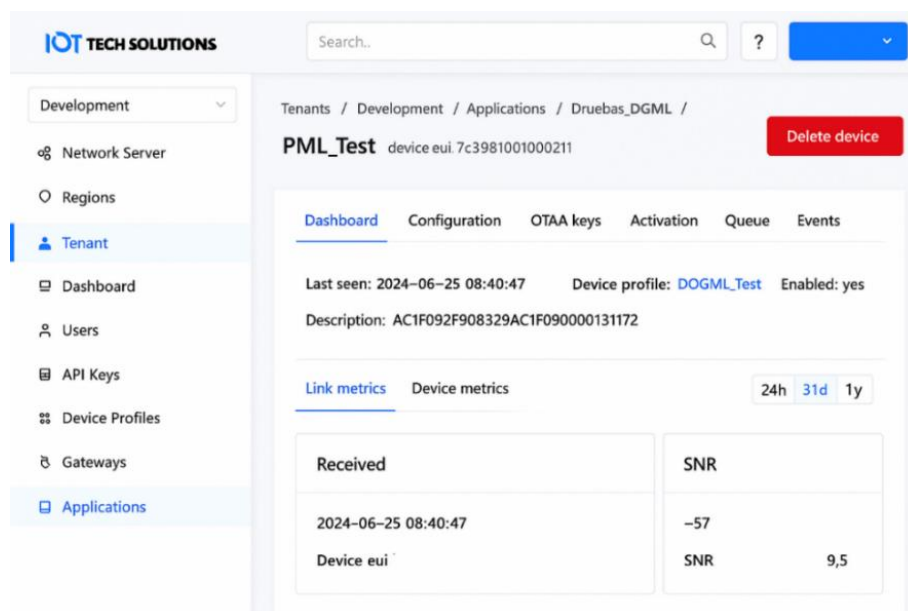


Fig 28. Servidor de aplicaciones de los escenarios de prueba No. 1 y No. 2.

Fuente. IoT Tech Solutions S.A.S. [69].

En las siguientes Tabla IX Tabla X se muestran los parámetros fijos y variables del escenario de prueba No. 1.

Tabla IX.

Parámetros fijos de la configuración del escenario de prueba No. 1.

Parámetro	Configuración seleccionada
Banda de frecuencia	AU915
Sub – banda	8 (Canal 7 – 916.6 MHz)
Identificadores de red	DevEUI, NwkSKey, AppSKey
Tipo de red	LoRaWAN
Dispositivos	Servidor de red ChirpStack, Gateway UG65, Modulo IoT DGML
No de datos	30 datos tomados por orientación del módulo IoT
Frecuencia	10 minutos entre cada medición

Nota: datos tomados de acuerdo con la Fase 2: diseño del escenario de prueba.

Tabla X.

Parámetros variables evaluados del escenario de prueba No. 1.

Parámetro	Rango o Condiciones
SF	8 y 9
DR	5 y 6
Distancia del Gateway	80 – 590 m (Zona Corta, Media y Larga)
Orientación del nodo	Orientación #1: Frente, Orientación #2: Espalda, Orientación #3: Hacia abajo
Métricas analizadas	RSSI (dBm), SNR (dB)

Nota: datos tomados de acuerdo con la Fase 2: diseño del escenario de prueba.

Se emplearon valores de SF 8 y 9 y DR 5 y 6, seleccionados por su balance entre alcance, sensibilidad y eficiencia en la transmisión [65], [66]. Estas configuraciones ofrecen un rendimiento óptimo en un entorno de campo con parámetros de comunicación estables, permitiendo una buena sensibilidad sin comprometer la tasa de transmisión ni el consumo energético, para cumplir con el objetivo de analizar la orientación física del módulo IoT.

2) Escenario de Prueba No. 2.

Como parte del diseño de los escenarios de prueba propuesto en la Fase 2, en el escenario de prueba No. 2, se utilizó la orientación del módulo IoT que presentó el mejor rendimiento en el escenario No. 1. Utilizando las mismas tres zonas de distancia, se evaluaron múltiples combinaciones críticas de SF y DR, con el fin de evaluar la robustez del enlace, la cobertura efectiva y la eficiencia energética del sistema LoRaWAN en un entorno real. Este escenario de prueba permitió observar el comportamiento de la red ante variaciones operativas más exigentes.

La topología de red que se implementará se muestra en la Fig 20, la cual está compuesta por un servidor de red (Network Server), un Gateway UG65 y un módulo IoT DGML, los cuales se conectarán mediante enlaces de comunicación utilizando el protocolo LoRaWAN.

Dispositivos de prueba: La arquitectura de la red LoRaWAN en este escenario de prueba No 2 se definió por los siguientes elementos cuya funcionalidad y justificación técnica de los dispositivos se basó en criterios de compatibilidad, eficiencia energética y rendimiento en condiciones reales como se describen a continuación:

- **Network Server (ChirpStack):** Servidor de red de código abierto encargado de gestionar la comunicación entre los nodos y el servidor de aplicaciones. Administra la autenticación, enruta los mensajes y almacena los datos recibidos, siendo compatible con múltiples plataformas IoT. Su arquitectura modular y abierta permite una fácil integración y adaptabilidad en distintos entornos [65], la interfaz mostrada en la Fig 21.
- **Gateway (Milesight UG65):** dispositivo de ocho canales que actúa como punto central de comunicación entre el módulo IoT y el servidor de red. Su capacidad de cobertura de hasta 2 km en zonas urbanas, múltiples interfaces de conectividad Ethernet, WiFi, LTE y resistencia ambiental lo hacen ideal para entornos industriales o urbanos exigentes [66], mostrado en la Fig 22.
- **Módulo IoT (DGML):** Nodo terminal con capacidades de transmisión LoRaWAN, bajo consumo energético y transmisión sincrónica o asincrónica de datos. Se empleó por su eficiencia energética, compatibilidad con LoRaWAN y facilidad de integración con sensores externos para aplicaciones de telemetría y monitoreo urbano [67], mostrado en la Fig 23.
- **PC Local:** Se empleó para la configuración del Gateway y del servidor ChirpStack, así como para el monitoreo y control en tiempo real del escenario de prueba.
- **Nube (Servidor de Aplicaciones):** Plataforma del servidor ChirpStack en la que se almacenan y visualizan los datos recolectados, permitiendo acceso remoto, análisis posterior y trazabilidad del desempeño de la red.

Selección de requisitos de comunicación: Se definieron los siguientes parámetros de comunicación, los cuales influyen directamente en el comportamiento del enlace y la calidad de la transmisión en la red LoRaWAN:

- RSSI.
- SNR.
- SF.
- DR.
- **Ubicación de las mediciones:** La Fig 24 presenta la disposición del módulo IoT en las diferentes orientaciones evaluadas con respecto al Gateway, aspecto fundamental para

analizar el impacto de la orientación sobre la calidad del enlace. Las mediciones de desempeño se llevaron a cabo en tres zonas de prueba, determinadas por la distancia entre el módulo IoT y el Gateway, las cuales se ilustran en las Fig 25, Fig 26 y Fig 27. Estas ubicaciones permitieron evaluar el comportamiento del enlace en diferentes condiciones de cobertura, desde entornos cercanos con alta intensidad de señal hasta zonas más alejadas con mayor atenuación y presencia de interferencias ambientales.

Configuración de requisitos LoRaWAN: La red se configuró bajo los siguientes lineamientos técnicos para garantizar la interoperabilidad y eficiencia de la transmisión, la configuración incluye:

- Banda de frecuencia.
- Identificadores de red, se muestran en la Fig 28.
- Tipo de red.
- Arquitectura: Módulo IoT (Nodo) – Gateway – Network Server – Nube.
- PC de monitoreo.

En las siguientes Tabla XI Tabla XII se muestran los parámetros fijos y variables del escenario de prueba No. 2.

Tabla XI.

Parámetros fijos de la configuración del escenario de prueba No. 2.

Parámetro	Configuración seleccionada
Banda de frecuencia	AU915
Sub - banda	8 (canal 7 - 916.6 MHz)
Red	LoRaWAN
Dispositivos	Servidor de red ChirpStack, Gateway UG65, Modulo IoT DGML
No. de datos	30 datos tomados por orientación del módulo IoT
Frecuencia	10 minutos entre cada medición

Nota: datos tomados de acuerdo con la fase 2: del diseño del escenario de prueba.

Tabla XII.

Parámetros variables evaluados del escenario de prueba No. 2.

Parámetro	Rango o Condiciones
SF	7 a 10
DR	4 a 7
Distancia del Gateway	80 – 590 m (Zona Corta, Media y Larga)
Orientación Modulo IoT	Determinada a partir de los resultados del escenario de prueba No 1
Variables medidas	RSSI (dBm), SNR (dB)

Nota: datos tomados de acuerdo con la fase 2: del diseño del escenario de prueba.

La combinación de los factores SF y DR se ajustó para comprender su impacto sobre la calidad del enlace. Por ejemplo, SF 7 y DR 4 permiten transmisiones rápidas con menor alcance, mientras que SF 10 y DR 7 ofrecen mayor cobertura a costa de mayor tiempo de transmisión, lo cual afecta directamente al consumo energético del nodo [70], [71].

CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS.

En esta fase, se realiza la implementación de los escenarios de prueba previamente diseñados en la Fase 2 del Capítulo III: Metodología de trabajo, con el fin de evaluar el rendimiento del sistema en los escenarios de prueba No. 1 y No. 2. Durante el desarrollo de estas pruebas, se realizará la recolección sistemática de los datos generados por los dispositivos. Finalmente, se llevará a cabo un análisis de los resultados obtenidos, a partir del cual se establecerán recomendaciones técnicas orientadas a mejorar el desempeño de la red, teniendo en cuenta los parámetros de desempeño seleccionados.

A. Recolección y análisis de datos.

Una vez definidos los escenarios de prueba en la Fase 2, se procedió a su implementación práctica y posterior análisis. Para el escenario de prueba No. 1, se posicionó el módulo IoT en tres orientaciones distintas de frente, de espaldas y hacia abajo, ubicadas en tres zonas previamente determinadas por su distancia al Gateway. En esta etapa, se mantuvieron fijos los parámetros de comunicación SF y DR en valores intermedios, con el objetivo de aislar el impacto de la orientación sobre la calidad del enlace, evaluada mediante métricas como RSSI y SNR.

Posteriormente, en el escenario de prueba No. 2, se aplicó la orientación del módulo que mostró mejor desempeño en el escenario de pruebas No. 1, manteniendo las mismas zonas de distancia. Sin embargo, se introdujeron múltiples combinaciones de SF y DR consideradas críticas, con el fin de validar el comportamiento de la red bajo condiciones reales y exigentes, evaluando aspectos como la estabilidad del enlace, cobertura efectiva y eficiencia energética del sistema.

El análisis de resultados incluyó dos niveles: uno general, basado en técnicas estadísticas descriptivas (media, mediana, varianza y desviación estándar) para obtener una visión global del comportamiento de las variables en ambos escenarios; y otro detallado, enfocado en modelar la relación entre los parámetros de comunicación y el rendimiento de la red. A partir de este análisis, se formularon recomendaciones orientadas a potenciar la implementación de redes LoRaWAN en aplicaciones similares.

1) Escenario de Prueba No. 1.

Para la implementación del escenario de prueba No. 1, se desplegó el módulo IoT en tres orientaciones distintas: Orientación #1: de frente, Orientación #2: de espaldas y Orientación #3: hacia abajo, dentro de un entorno de campo y en tres zonas de prueba definidas por diferentes rangos de distancia respecto al Gateway. En este escenario se aplicaron parámetros de comunicación estables, con valores intermedios de SF y DR, permitiendo analizar el impacto exclusivo de la orientación física del nodo sobre la calidad del enlace, evaluado mediante parámetros como RSSI y SNR.

Para cada orientación del módulo IoT, se tomaron 30 datos cada 10 minutos, permitiendo evaluar la variabilidad temporal de la señal bajo condiciones variables del entorno. Para el análisis de los datos, se examinarán las relaciones entre las variables SF, DR, RSSI y SNR en cada posición del módulo, permitiendo realizar un análisis comparativo del rendimiento del sistema y estableciendo una base para futuras recomendaciones de mejora. A continuación, se muestra la Tabla XIII en la cual se detallan los datos tomados en el escenario de prueba No. 1.

Tabla XIII.

Datos tomados del escenario de prueba No. 1.

Posición del módulo IoT	N° de dato	Distancia del módulo IoT al Gateway (m)	Coordenadas	Parámetros				Observaciones
				SF	DR	RSSI (dBm)	SNR (dB)	
Orientacion #1 del modulo IoT	1	80	2°26'35"N 76°37'15"W	8	5	-80	9.8	Al momento de tomar los datos el clima estuvo soleado, al aumentar la distancia no hubo interferencia al tomar los datos
	2	100	2°26'37"N 76°37'14"W	8	5	-82	8.19	
	3	110	2°26'39"N 76°36'14"W	8	5	-78	13.5	
	4	130	2°26'35"N 76°37'21"W	8	5	-87	14.19	
	5	150	2°26'41"N 76°37'20"W	8	5	-92	16.5	
	6	170	2°26'38"N 76°37'23"W	8	5	-89	12	
	7	180	2°26'43"N 76°37'16"W	8	5	-81	15	
	8	200	2°26'41"N 76°37'12"W	9	5	-76	13.5	
	9	220	2°26'39"N 76°37'10"W	9	5	-90	8.19	
	10	230	2°26'41"N 76°37'23"W	9	5	-88	12	
	11	250	2°26'42"N 76°37'11"W	9	5	-85	13	
	12	280	2°26'43"N 76°37'11"W	9	5	-79	11	
	13	310	2°26'41"N 76°37'26"W	9	5	-87	15	
	14	340	2°26'41"N 76°37'28"W	9	5	-90	14	
	15	370	2°26'41"N 76°37'29"W	9	5	-98	13.8	
	16	400	2°26'39"N 76°37'30"W	8	6	-91	15.19	
	17	430	2°26'51"N 76°37'16"W	8	6	-89	15.5	
	18	460	2°26'52"N 76°37'17"W	8	6	-87	9.8	
	19	480	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-81	15.8	
	20	490	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-79	12.5	
	21	500	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-76	12	
	22	510	2°26'54"N 76°37'17"W	8	6	-87	13	
	23	520	2°26'54"N 76°37'17"W	9	6	-85	14.5	
	24	530	2°26'54"N 76°37'16"W	9	6	-91	10.8	
	25	540	2°26'55"N 76°37'16"W	9	6	-93	15	

Orientacion #2 del modulo IoT	26	550	2°26'55"N 76°37'16"W	9	6	-88	14.5	Al momento de tomar los datos el clima estuvo soleado, al aumentar la distancia hubo interferencia en la toma de los datos
	27	560	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-79	12	
	28	570	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-90	13.5	
	29	580	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-89	14.19	
	30	590	2°26'57"N 76°37'16"W	9	6	-94	16	
	31	80	2°26'35"N 76°37'15"W	8	5	-90	12	
	32	100	2°26'37"N 76°37'14"W	8	5	-98	13	
	33	110	2°26'39"N 76°36'14"W	8	5	-87	10.1	
	34	130	2°26'35"N 76°37'21"W	8	5	-78	12.5	
	35	150	2°26'41"N 76°37'20"W	8	5	-88	13.5	
	36	170	2°26'38"N 76°37'23"W	8	5	-89	14.19	
	37	180	2°26'43"N 76°37'16"W	8	5	-97	9.19	
	38	200	2°26'41"N 76°37'12"W	9	5	-86	15.5	
	39	220	2°26'39"N 76°37'10"W	9	5	-70	14	
	40	230	2°26'41"N 76°37'23"W	9	5	-87	13.8	
	41	250	2°26'42"N 76°37'11"W	9	5	-80	10.1	
	42	280	2°26'43"N 76°37'11"W	9	5	-81	13	
	43	310	2°26'41"N 76°37'26"W	9	5	-98	15.5	
	44	340	2°26'41"N 76°37'28"W	9	5	-90	11	
	45	370	2°26'41"N 76°37'29"W	9	5	-77	13.6	
	46	400	2°26'39"N 76°37'30"W	8	6	-88	14.19	
	47	430	2°26'51"N 76°37'16"W	8	6	-91	10.5	
	48	460	2°26'52"N 76°37'17"W	8	6	-75	15.5	
	49	480	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-94	14.5	
	50	490	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-82	14	
	51	500	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-71	14.1	
	52	510	2°26'54"N 76°37'17"W	8	6	-90	10.5	
	53	520	2°26'54"N 76°37'17"W	9	6	-89	13.1	
	54	530	2°26'54"N 76°37'16"W	9	6	-97	15	
	55	540	2°26'55"N 76°37'16"W	9	6	-98	15	
	56	550	2°26'55"N 76°37'16"W	9	6	-86	15.5	
	57	560	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-98	9.5	

Orientacion #3 del modulo IoT	58	570	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-76	14.5
	59	580	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-89	13.19
	60	590	2°26'57"N 76°37'16"W	9	6	-99	8.8
	61	80	2°26'35"N 76°37'15"W	8	5	-79	11
	62	100	2°26'37"N 76°37'14"W	8	5	-92	12.19
	63	110	2°26'39"N 76°36'14"W	8	5	-81	14
	64	130	2°26'35"N 76°37'21"W	8	5	-90	10
	65	150	2°26'41"N 76°37'20"W	8	5	-88	13.19
	66	170	2°26'38"N 76°37'23"W	8	5	-90	14.8
	67	180	2°26'43"N 76°37'16"W	8	5	-78	13.8
	68	200	2°26'41"N 76°37'12"W	9	5	-80	10.1
	69	220	2°26'39"N 76°37'10"W	9	5	-91	13.5
	70	230	2°26'41"N 76°37'23"W	9	5	-89	14.19
	71	250	2°26'42"N 76°37'11"W	9	5	-90	12
	72	280	2°26'43"N 76°37'11"W	9	5	-95	13.19
	73	310	2°26'41"N 76°37'26"W	9	5	-78	10
	74	340	2°26'41"N 76°37'28"W	9	5	-88	11
	75	370	2°26'41"N 76°37'29"W	9	5	-91	13
	76	400	2°26'39"N 76°37'30"W	8	6	-89	14.19
	77	430	2°26'51"N 76°37'16"W	8	6	-75	11
	78	460	2°26'52"N 76°37'17"W	8	6	-87	13
	79	480	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-94	13.5
	80	490	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-82	14.5
	81	500	2°26'53"N 76°37'17"W	8	6	-79	9.1
	82	510	2°26'54"N 76°37'17"W	8	6	-97	11.5
	83	520	2°26'54"N 76°37'17"W	9	6	-90	13.19
	84	530	2°26'54"N 76°37'16"W	9	6	-89	15.8
	85	540	2°26'55"N 76°37'16"W	9	6	-98	14
	86	550	2°26'55"N 76°37'16"W	9	6	-89	13.5
	87	560	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-95	10.19
	88	570	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-82	13.5
	89	580	2°26'56"N 76°37'16"W	9	6	-99	14.19

90	590	2°26'57"N 76°37'16"W	9	6	-98	15
----	-----	----------------------	---	---	-----	----

A partir de los datos recolectados que se muestran en la Tabla XIII, se realizó un análisis para evaluar el comportamiento de la señal en función de la distancia, la orientación del módulo IoT y las combinaciones de parámetros SF y DR. El análisis de los datos recolectados se abordó en dos niveles: análisis general y análisis detallado.

Los resultados se organizan en tres secciones principales: comportamiento del RSSI, SNR y el SF/DR respecto al RSSI/SNR.

Comportamiento del RSSI:

- Distancia por orientación del módulo IoT:

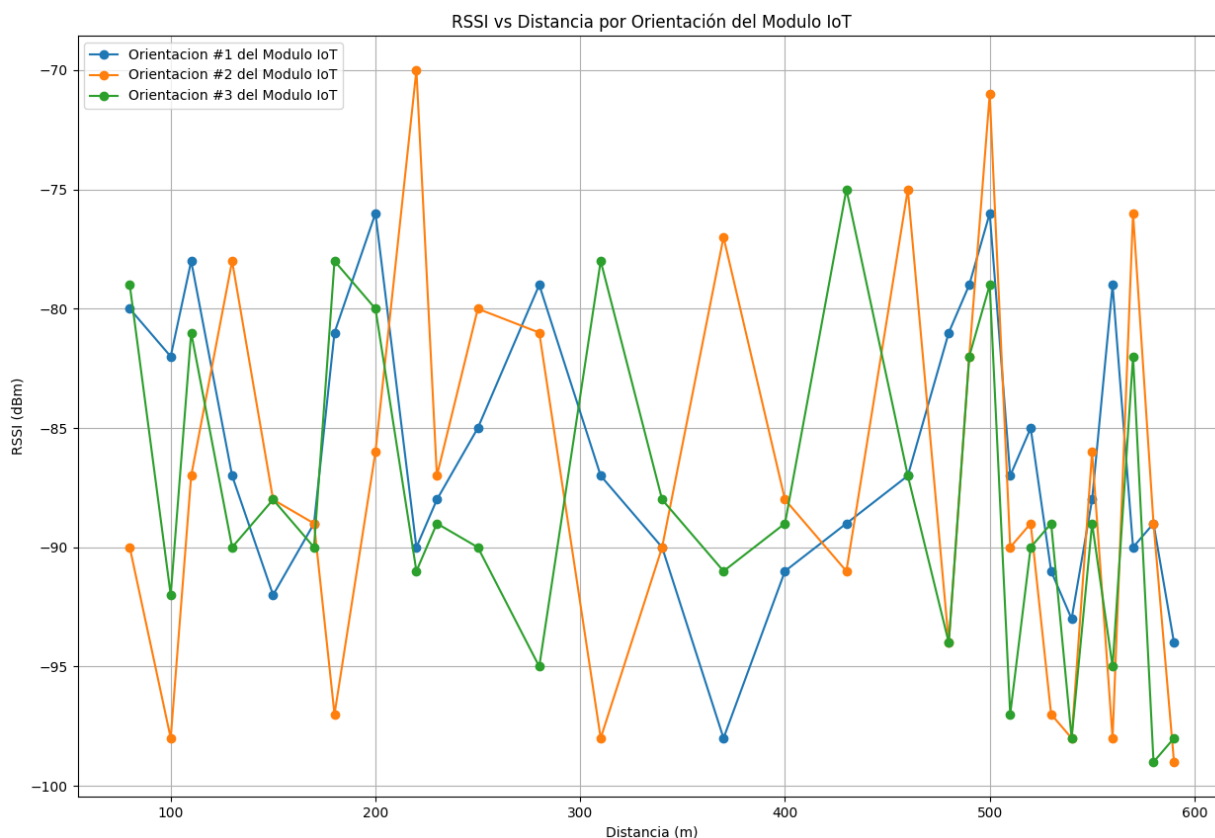


Fig 29. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por orientación del módulo IoT.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XIII.

La gráfica de la Fig 29 muestra la variación del RSSI respecto a la distancia para las tres orientaciones evaluadas del módulo IoT. Se observa lo siguientes:

- El análisis por orientaciones mostró que la Orientación #1 fue la más estable en términos de RSSI, manteniendo una variación moderada a lo largo de las distintas

distancias. Si bien se presentaron oscilaciones, estas fueron menos pronunciadas en comparación con las otras orientaciones. En contraste, la Orientación #2 presentó un comportamiento más irregular, con picos de señal cercanos a -70 dBm, pero también con caídas abruptas por debajo de -95 dBm. La Orientación #3 registró fluctuaciones intermedias: más notables que en la Orientación #1, aunque menos críticas que las observadas en la Orientación #2.

- Al revisar los valores promedio de RSSI, se encontró que la Orientación #1 se mantuvo en la mayoría de los puntos en niveles más altos (menos negativos), lo que indica un mejor desempeño en la recepción de la señal. En cambio, las orientaciones #2 y #3 se mantuvieron en la mayoría de los puntos en niveles más bajos de -90 dBm, evidenciando una señal más débil y menos confiable.
- Finalmente, en el rendimiento en distancias largas (>450 m), la Orientación #1 continuó mostrando valores relativamente consistentes, lo que representa una ventaja en zonas con mayor atenuación. Por el contrario, la Orientación #2 experimentó una caída más pronunciada a medida que la distancia se incrementó, mientras que la Orientación #3 también presentó una disminución en el rendimiento, aunque mantuvo un comportamiento intermedio entre las otras dos orientaciones.

Estadística compartida: La siguiente Tabla XIV resume las estadísticas principales de la gráfica de la Fig 29, donde se constata que todas las orientaciones alcanzaron un máximo de -70 dBm buena recepción y un mínimo de -99 dBm límite crítico para enlaces estables.

Tabla XIV.

Estadísticas de RSSI por orientación del módulo IoT.

Orientación del Módulo IoT	Promedio RSSI (dBm)	Mínimo RSSI (dBm)	Máximo (dBm)	Desviación estándar (dBm)
Orientación #1	-86.41	-99.00	-70.00	6.74
Orientación #2	-87.61	-99.00	-70.00	7.71
Orientación #3	-87.50	-99.00	-70.00	6.49

Nota: datos tomados del análisis de los datos de la Tabla XIII.

Los resultados muestran que la Orientación #1 obtuvo el mejor promedio de RSSI, con valores menos negativos que los de las demás orientaciones, lo que refleja una recepción de señal

más estable y confiable. En los valores mínimos, las tres orientaciones alcanzaron alrededor de -99 dBm, considerado el límite crítico para mantener enlaces confiables en LoRa/LoRaWAN.

En los valores máximos, todas las orientaciones registraron aproximadamente -70 dBm, señal que corresponde a condiciones favorables o cercanas al Gateway. En cuanto a la variabilidad, la Orientación #2 presentó la mayor desviación estándar, evidenciando fluctuaciones más severas en la calidad del enlace, mientras que la Orientación #3 mostró un comportamiento más estable, aunque aún por debajo de la consistencia observada en la Orientación #1.

El gráfico de la Fig 29 evidencia cómo la orientación física del módulo IoT influye significativamente en la calidad del enlace de comunicación medida mediante RSSI. Se observa que la Orientación #1 (de frente) presenta los mejores niveles promedio de señal, con valores cercanos a los -90 dBm, mientras que la Orientación #2 (de espalda) muestra caídas pronunciadas en las distancias de la zona media, posiblemente causadas por interferencias por el clima del entorno. La Orientación #3 (hacia abajo) presenta un rendimiento intermedio. Esta información es crucial para aplicaciones reales, ya que sugiere que la orientación física del módulo IoT debe ser cuidadosamente controlada durante la instalación para garantizar una comunicación estable. Se recomienda estandarizar su orientación durante el montaje. La orientación física del módulo IoT influye significativamente en el RSSI y la Orientación #1 optimiza la propagación de la señal. Este hallazgo respalda la recomendación de estandarizar esta orientación durante la instalación y su utilización en otros escenarios de prueba.

- Análisis de pérdida de señal RSSI respecto al modelo teórico:

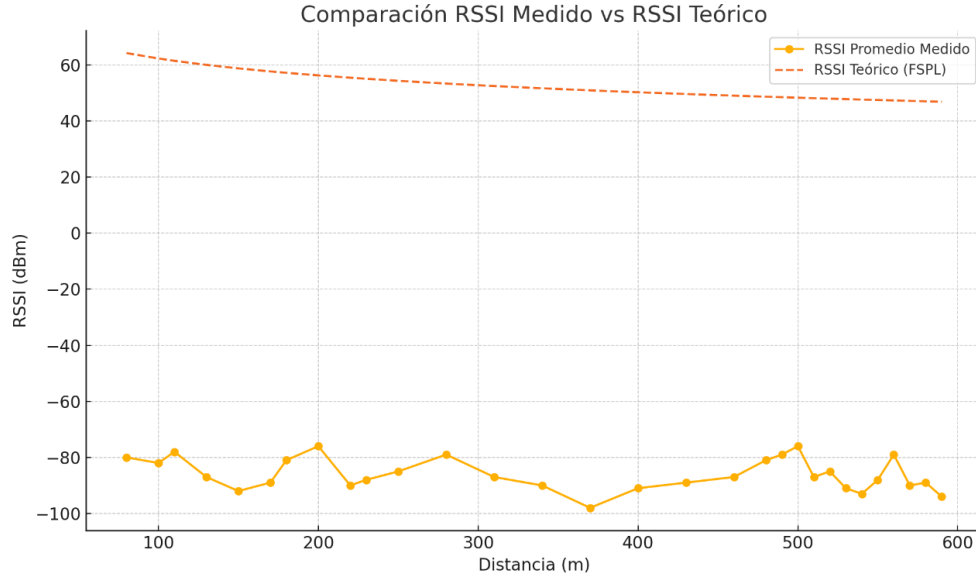


Fig 30. Gráfico de línea de comparación de RSSI medido vs. RSSI teórico en función de la Distancia.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XIII con base en Beltran, J y Aguilar, C [72], [73].

La gráfica de la Fig 30 presenta una comparación entre los valores medidos de RSSI y los calculados mediante el modelo teórico de pérdida en espacio libre (FSPL). El modelo, ajustado para 915 MHz y una potencia de transmisión de 14 dBm [72], [73], establece que:

- Modelo Teórico de Pérdida en Espacio Libre.

La ecuación general del modelo es (4):

$$PL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147.55 \quad (4)$$

Donde: $PL(dB)$ es pérdida de señal en dB, d es distancia entre el transmisor y el receptor en metros, f es frecuencia de operación en Hz y 147.55 es una constante que ajusta las unidades para distancia en metros y frecuencia en Hz [72], [73].

El RSSI teórico se obtiene con la siguiente ecuación (5) [73].

$$RSSI_{teorico} = P_{Tx} - PL(dB) \quad (5)$$

Donde P_{Tx} es la potencia de transmisión del módulo IoT (14 dBm).

- Al aplicar el modelo para una frecuencia típica de LoRaWAN (915 MHz) y una potencia de transmisión de 14 dBm, obtenemos lo siguiente ecuación (4):

$$PL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(9.15 \times 10^8) - 147.55 \quad (4)$$

$$\Rightarrow PL(dB) \approx 20 \log_{10}(d) + 59.2$$

En la siguiente Tabla XV se muestran los ejemplos teóricos de RSSI y PL en función de la distancia de acuerdo con la gráfica de la Fig 30:

Tabla XV.

Datos de PL y RSSI teóricos en función de la distancia.

Distancia (m)	PL (dB)	RSSI Teórico (dBm)
100	99.2	-85.5
200	105.2	-91.2
500	113.2	-99.2
590	115.6	-101.6

Nota: datos tomados de acuerdo con las fórmulas (4) y (5) del RSSI teórico y modelo teórico de pérdida en espacio libre (PL).

- Comparación con Datos Reales: En las pruebas realizadas a 100 m, el RSSI medido varió entre -68 y -82 dBm, un resultado superior al valor teórico estimado de -85,2 dBm. A una distancia de 590 m, en cambio, los valores registrados estuvieron entre -94 y -120 dBm, lo que se aproximó o incluso quedó por debajo del valor teórico proyectado de -101,6 dBm.
- El modelo FSPL resulta útil como referencia ideal; sin embargo, los resultados muestran que en distancias cortas los valores medidos fueron mejores que los del modelo, debido a condiciones favorables como la línea de vista directa. En distancias mayores, factores como la orientación de los dispositivos, la presencia de obstáculos y las características del entorno semicontrolado introdujeron pérdidas adicionales, lo que confirma la necesidad de un análisis empírico complementario al modelo teórico.

En la gráfica de la Fig 30 se observa una diferencia creciente entre el RSSI teórico y el medido a medida que aumenta la distancia. Esta diferencia sugiere la presencia de pérdidas adicionales no consideradas por el modelo teórico de propagación probablemente basado en FSPL. Dichas pérdidas podrían atribuirse a obstrucciones físicas, reflexiones e interferencias de RF del entorno urbano. Además, factores como la altura del Gateway, la ganancia real de las antenas y la

posible desalineación entre transmisor y receptor influyen significativamente en la atenuación. Este resultado resalta la necesidad de ajustes empíricos al modelo teórico para escenarios reales.

Comportamiento del SNR:

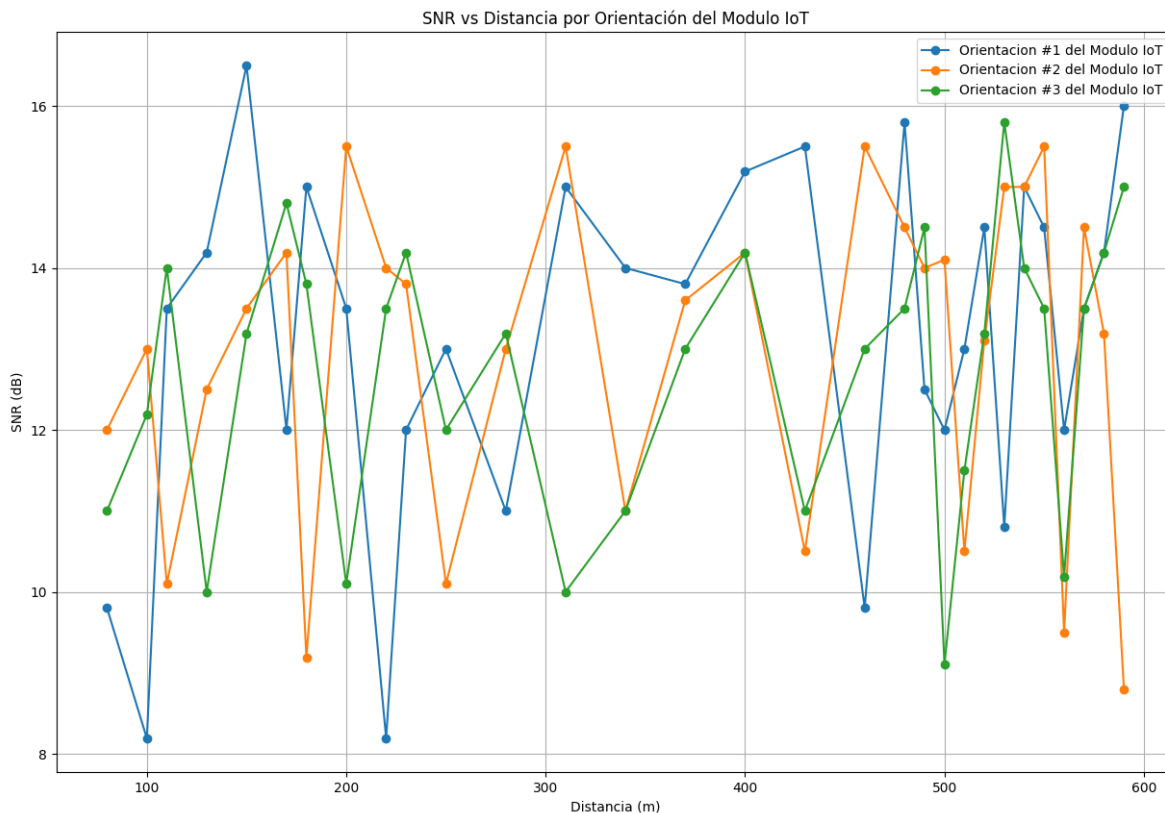


Fig 31. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por orientación del módulo IoT.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XIII.

La gráfica de la Fig 31 evidencia cómo varía el SNR en función de la distancia y la orientación del módulo, se observa lo siguiente:

- Desempeño por orientación.
 - Orientación #1 (de frente): Esta posición presentó los valores de SNR más estables a lo largo de las diferentes zonas de distancia. Aunque en algunos puntos se registraron niveles por debajo de 10 dB, en la mayoría de los tramos se mantuvieron valores superiores a 14 dB, especialmente a partir de los 310 m. Además, alcanzó el valor máximo más alto, cercano a 16,5 dB, lo que refleja una buena calidad de enlace incluso en distancias prolongadas.

- Orientación #2 (de espalda): El rendimiento fue intermedio. Los valores de SNR fueron más dispersos y mostraron caídas pronunciadas entre los 310 y 550 m. Si bien en ciertos puntos se alcanzaron niveles altos, la variabilidad fue mayor, lo que podría comprometer la estabilidad del enlace.
- Orientación #3 (hacia abajo): Esta posición resultó la menos estable. Aunque en distancias cortas y medias logró valores aceptables, presentó con frecuencia registros por debajo de 10 dB. En tramos largos, superiores a los 500 m, la calidad del enlace se redujo de forma considerable.

De manera general, la Orientación #1 fue la orientación con mejor rendimiento en términos de SNR, ya que ofreció mayor estabilidad, menor dispersión en los valores y picos superiores en distancias largas, donde la propagación directa es determinante. Este comportamiento confirma que una orientación adecuada hacia el Gateway mejora significativamente la calidad del enlace, al favorecer el patrón de radiación de la antena y reducir pérdidas por interferencia o atenuación.

La gráfica de la Fig 31 respalda los hallazgos, mostrando que, aunque los valores de SNR presentan cierta variabilidad, se mantienen en niveles adecuados para garantizar una comunicación de la LoRaWAN confiable. La Orientación #1 evidenció el mejor desempeño general, mientras que la #2 mostró mayor inestabilidad y caídas críticas y la #3 mostró una tendencia a degradarse en distancias largas. No se identificó una disminución sistemática del SNR con el aumento de la distancia, lo que sugiere que la orientación física del dispositivo tiene mayor impacto que la distancia en las condiciones evaluadas. Por ello, se recomienda emplear la Orientación #1 en aplicaciones reales para asegurar una mejor calidad de enlace.

Comportamiento de SF y DR respecto el RSSI y SNR en función de la Distancia:

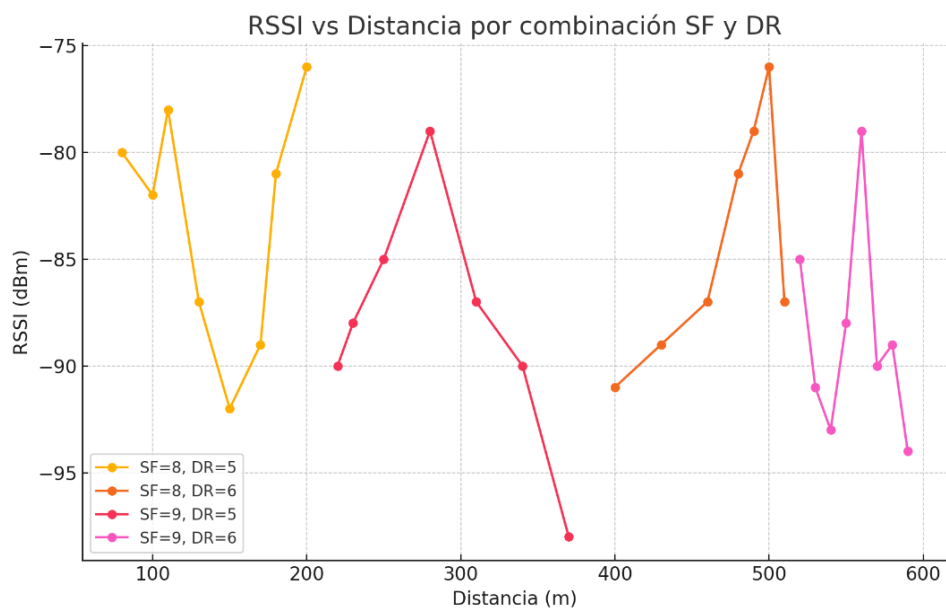


Fig 32. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por combinación de SF y DR.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XIII.

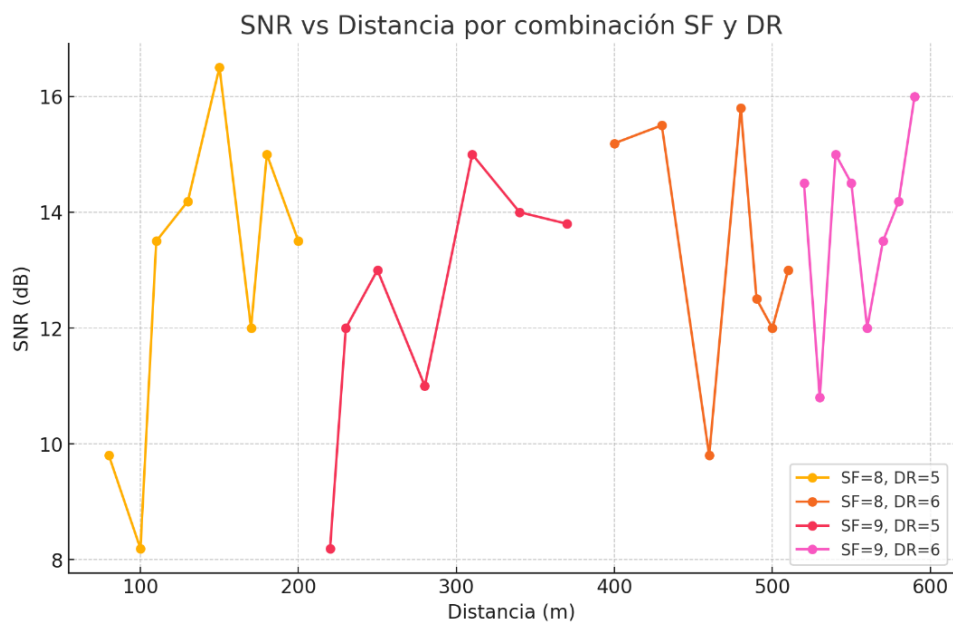


Fig 33. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por combinación de SF y DR.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XIII.

Las graficas de las Fig 32 y Fig 33 analizan cómo las combinaciones de SF y DR afectan los parámetros de enlace RSSI y SNR:

- SF más altos como SF 9 y SF 10 tienden a generar valores más negativos de RSSI, lo que indica mayor atenuación, pero mantienen SNR aceptable gracias a una mayor robustez en la modulación. Esto significa que la red LoRaWAN puede seguir funcionando incluso con señales débiles si se usan SF altos.
- DR altos como DR 6 y DR 7 no siempre implican mejor calidad de enlace. En algunos tramos, el SNR mejora, pero el RSSI sigue dependiendo fuertemente de la distancia y orientación del nodo.
- La mejor combinación observada fue SF 9 – DR 5 o SF 10 – DR 4, ya que mantuvieron conectividad a distancias largas con valores aceptables de SNR, a pesar de un RSSI más negativo.

Las gráficas de las Fig 32 y Fig 33 permiten analizar cómo distintas combinaciones de SF y DR afectan el rendimiento del enlace. Se evidencia que combinaciones como SF9 – DR5 mantienen un RSSI estable con una menor atenuación a medida que la distancia aumenta, mientras que combinaciones como SF 7 – DR 7 presentan una rápida degradación de señal. El SNR también refleja estas tendencias, confirmando que mayores valores de SF permiten mejorar la sensibilidad del receptor, aunque a costa de una mayor duración en el tiempo de aire y, por tanto, mayor consumo energético. Esta relación sugiere un trade-off técnico importante entre eficiencia energética y robustez del enlace, que debe ser considerado al configurar los dispositivos.

Se concluye que, para zonas con altas interferencias, se recomienda utilizar valores de SF altos y DR bajos, mientras que, para entornos más cercanos y despejados, configuraciones con DR más altos pueden ser más eficientes.

De acuerdo con el anterior análisis general de los datos recolectados en la Tabla XIII, se realizó un análisis detallado con recomendaciones relevantes:

El análisis mostró que los parámetros SF y DR influyen de manera directa en el rendimiento del enlace. Con un SF alto como SF 9 o SF 10 se logra mayor robustez frente a la atenuación, lo que permite conservar la conectividad en distancias largas. Sin embargo, este beneficio implica que el RSSI se vuelva más negativo, reflejando una pérdida progresiva de potencia en la señal.

En cuanto al DR, se observó que las configuraciones altas como DR 6 o DR 7 no necesariamente mejoran la calidad del enlace. Aunque permiten incrementar la tasa de transmisión, su desempeño resulta muy sensible a la orientación del nodo y a la distancia respecto al Gateway. Por esta razón, la combinación más adecuada en escenarios de largas distancias o entornos con ruido es emplear SF altos como SF 9 o SF 10 junto con DR moderados como DR 4 o DR 5, priorizando la estabilidad y confiabilidad de la comunicación sobre la velocidad de transmisión.

En cuanto al comportamiento del RSSI según la orientación en la gráfica de la Fig 29 se observa que, la Orientación #1, correspondiente a la posición de frente al Gateway, presentó el mejor desempeño, manteniendo valores de RSSI más altos y estables a lo largo de todo el rango de distancias. En contraste, la Orientación #2, al situarse de espaldas, mostró una señal muy variable, con picos fuertes, pero también caídas abruptas que afectan la confiabilidad.

La Orientación #3, con el módulo IoT hacia abajo respecto al Gateway, presentó un rendimiento intermedio, menos estable que la primera, pero más constante que la segunda. Se recomienda posicionar el módulo IoT con la Orientación #1 de frente al Gateway siempre que sea posible, con el fin de mejorar el patrón de radiación y minimizar las pérdidas ocasionadas por la orientación.

En la comparación con el modelo FSPL, se determinó en la gráfica de la Fig 30 que, en distancias cortas, entre 100 y 200 m, los valores reales de RSSI superaron lo proyectado por el modelo, gracias a condiciones óptimas como la línea de vista directa. Sin embargo, en distancias mayores a 500 m, las mediciones reales mostraron pérdidas superiores a las previstas, producto de los obstáculos y la variabilidad del entorno. Esto permitió concluir que el modelo FSPL debe considerarse como una referencia inicial, pero siempre complementado con mediciones empíricas en escenarios reales.

Respecto al comportamiento del SNR según la orientación en la gráfica de la Fig 31 se observa que, la Orientación #1 ofreció los valores más altos y estables, incluso en distancias largas superiores a 500 m, donde en varios tramos logró mantenerse por encima de los 14 dB. Las orientaciones #2 y #3 evidenciaron mayor variabilidad y una degradación progresiva del SNR conforme aumentaba la distancia. Por ello, se recomienda priorizar la instalación en Orientación #1, especialmente en configuraciones fijas, ya que optimiza tanto el RSSI como el SNR, factores fundamentales para garantizar enlaces confiables.

Finalmente, al analizar la relación entre los parámetros SF/DR y el comportamiento de la señal de las gráficas de las Fig 32 y Fig 33, se concluyó que un SF alto permite compensar señales débiles mediante un mejor SNR, lo que hace posible mantener la conectividad incluso cuando el RSSI es bajo. En contraste, valores altos de DR no resultan óptimos en distancias largas, ya que requieren un canal con mejor calidad. Se recomienda configurar los parámetros según el entorno: en distancias cortas, emplear DR altos para favorecer la eficiencia y velocidad, mientras que, en distancias largas o entornos ruidosos, se debe optar por SF altos combinados con DR bajos, priorizando la estabilidad del enlace sobre la velocidad de transmisión.

Se identificaron hallazgos determinantes relacionados con la orientación del módulo IoT, de los parámetros de comunicación SF y DR y su impacto en los parámetros de calidad del enlace RSSI y SNR. Se evidenció que la orientación #1 (de frente) ofreció el mejor desempeño general, presentando valores más altos y estables de RSSI y SNR a lo largo de todas las distancias evaluadas, especialmente a partir de los 500 m. Esta orientación favoreció una propagación más directa de la señal, optimizando el patrón de radiación de la antena.

Respecto a los parámetros de comunicación, se concluyó que las combinaciones de SF altos SF 9 y SF 10 con DR moderados DR 4 y DR 5 ofrecieron un equilibrio óptimo entre cobertura, robustez y estabilidad del enlace. Estas configuraciones permitieron mantener la conectividad en condiciones de alta atenuación, aunque con niveles de RSSI más negativos. En contraste, los valores elevados de DR como 6 y 7, no garantizaron una mejor calidad de enlace, mostrando sensibilidad a la distancia y a la orientación del nodo.

Al comparar los valores medidos de RSSI con el modelo FSPL, se evidenció que en distancias cortas la existencia de una línea de vista directa favoreció un mejor desempeño frente a lo proyectado por el modelo. En cambio, en distancias mayores, factores como la presencia de obstáculos y la variabilidad del entorno introdujeron pérdidas adicionales. Estos resultados confirman la necesidad de complementar los cálculos teóricos con mediciones empíricas, especialmente en escenarios reales donde las condiciones ambientales no son ideales.

En función de los hallazgos obtenidos, se recomienda priorizar la instalación del módulo IoT con orientación frontal hacia el Gateway, ya que esta disposición favorece la calidad del enlace. Asimismo, se sugiere emplear combinaciones de SF altos con DR moderados en entornos ruidosos o en escenarios de largas distancias, con el fin de garantizar una conectividad más estable. También resulta conveniente aplicar configuraciones dinámicas de SF y DR en función del entorno, de

manera que en distancias cortas se utilicen DR altos, mientras que en condiciones más exigentes se opte por SF altos con DR bajos. Finalmente, se aconseja usar el modelo FSPL únicamente como referencia inicial, validándolo siempre con datos de campo que permitan asegurar una planificación más precisa y confiable de las redes LoRaWAN.

2) *Escenario de Prueba No. 2.*

En el escenario de prueba No. 2, se empleó la orientación del módulo IoT que mostró mejor desempeño en el escenario de prueba No. 1 (Orientación #1: de frente). Utilizando las mismas zonas de distancia previamente definidas, se implementaron múltiples combinaciones de SF y DR consideradas exigentes. Esta configuración permitió validar la robustez, estabilidad y eficiencia de la red LoRaWAN en condiciones extremas de operación, evaluando su comportamiento ante variaciones en los parámetros de comunicación.

Para cada variación de DR, se tomaron 30 datos con un intervalo de 10 minutos entre cada medición, lo cual permitió obtener un conjunto representativo y distribuido temporalmente de las métricas de desempeño. La información recopilada permitirá analizar aspectos como la estabilidad, cobertura y eficiencia de la red en condiciones reales y constituirá la base para la formulación de recomendaciones técnicas orientadas a mejorar su funcionamiento. Para el análisis, se agruparán los valores de RSSI y SNR según las combinaciones de SF y DR, se calcularán estadísticas descriptivas y se observarán las tendencias que reflejen el comportamiento del sistema bajo las distintas configuraciones. A continuación, se muestra la Tabla XVI en la cual se muestran los datos obtenidos en el escenario de prueba No. 2.

Tabla XVI.

Datos tomados del escenario de prueba No. 2.

Posición del módulo IoT	N° de dato	Distancia del módulo IoT al Gateway (m)	Coordenada	Parámetros				Observaciones
				SF	DR	RSSI (dBm)	SNR (dB)	
Orientación #1 del módulo IoT	1	80	2°26'35"N 76°37'15"W	7	4	-48	13.8	Al momento de tomar los datos el clima estuvo soleado, al aumentar la distancia y disminuir el DR hubo interferencia en la toma de los datos
	2	100	2°26'37"N 76°37'14"W	7	4	-68	10.5	
	3	110	2°26'39"N 76°36'14"W	7	4	-70	10	
	4	130	2°26'35"N 76°37'21"W	7	4	-100	14.19	
	5	150	2°26'41"N 76°37'20"W	7	4	-98	9.19	
	6	170	2°26'38"N 76°37'23"W	7	4	-89	10.5	
	7	180	2°26'43"N 76°37'16"W	7	4	-90	13	
	8	200	2°26'41"N 76°37'12"W	8	4	-89	11.5	
	9	220	2°26'39"N 76°37'10"W	8	4	-69	10	
	10	230	2°26'41"N 76°37'23"W	8	4	-50	14	
	11	250	2°26'42"N 76°37'11"W	8	4	-89	11.5	
	12	280	2°26'43"N 76°37'11"W	8	4	-91	13.1	
	13	310	2°26'41"N 76°37'26"W	8	4	-69	10	
	14	340	2°26'41"N 76°37'28"W	8	4	-101	16	
	15	370	2°26'41"N 76°37'29"W	8	4	-90	14.19	
	16	400	2°26'39"N 76°37'30"W	9	4	-70	14	
	17	430	2°26'51"N 76°37'16"W	9	4	-69	10.8	
	18	460	2°26'52"N 76°37'17"W	9	4	-88	10.8	
	19	480	2°26'53"N 76°37'17"W	9	4	-97	11.5	
	20	490	2°26'53"N 76°37'17"W	9	4	-57	13.5	
	21	500	2°26'53"N 76°37'17"W	9	4	-90	11.5	
	22	510	2°26'54"N 76°37'17"W	9	4	-102	9.1	
	23	520	2°26'54"N 76°37'17"W	10	4	-88	10.8	
	24	530	2°26'54"N 76°37'16"W	10	4	-100	15	
	25	540	2°26'55"N 76°37'16"W	10	4	-99	10.8	

26	550	2°26'55"N 76°37'16"W	10	4	-89	15.5
27	560	2°26'56"N 76°37'16"W	10	4	-100	15.19
28	570	2°26'56"N 76°37'16"W	10	4	-90	11.8
29	580	2°26'56"N 76°37'16"W	10	4	-94	13.5
30	590	2°26'57"N 76°37'16"W	10	4	-120	12
31	80	2°26'35"N 76°37'15"W	7	5	-50	13.2
32	100	2°26'37"N 76°37'14"W	7	5	-74	11.2
33	110	2°26'39"N 76°36'14"W	7	5	-67	13.5
34	130	2°26'35"N 76°37'21"W	7	5	-90	16.5
35	150	2°26'41"N 76°37'20"W	7	5	-120	14.19
36	170	2°26'38"N 76°37'23"W	7	5	-95	9.2
37	180	2°26'43"N 76°37'16"W	7	5	-87	13.5
38	200	2°26'41"N 76°37'12"W	8	5	-90	10
39	220	2°26'39"N 76°37'10"W	8	5	-67	12.2
40	230	2°26'41"N 76°37'23"W	8	5	-70	13.5
41	250	2°26'42"N 76°37'11"W	8	5	-77	13.1
42	280	2°26'43"N 76°37'11"W	8	5	-90	10
43	310	2°26'41"N 76°37'26"W	8	5	-80	13.5
44	340	2°26'41"N 76°37'28"W	8	5	-87	10.5
45	370	2°26'41"N 76°37'29"W	8	5	-99	14.19
46	400	2°26'39"N 76°37'30"W	9	5	-83	-4.2
47	430	2°26'51"N 76°37'16"W	9	5	-96	14.2
48	460	2°26'52"N 76°37'17"W	9	5	-90	13.5
49	480	2°26'53"N 76°37'17"W	9	5	-86	11
50	490	2°26'53"N 76°37'17"W	9	5	-100	13.8
51	500	2°26'53"N 76°37'17"W	9	5	-86	13.8
52	510	2°26'54"N 76°37'17"W	9	5	-96	12
53	520	2°26'54"N 76°37'17"W	10	5	-78	13.1
54	530	2°26'54"N 76°37'16"W	10	5	-98	15
55	540	2°26'55"N 76°37'16"W	10	5	-99	13.19
56	550	2°26'55"N 76°37'16"W	10	5	-90	15
57	560	2°26'56"N 76°37'16"W	10	5	-100	8.8

58	570	2°26'56"N 76°37'16"W	10	5	-102	13.8
59	580	2°26'56"N 76°37'16"W	10	5	-92	11.5
60	590	2°26'57"N 76°37'16"W	10	5	-84	11
61	80	2°26'35"N 76°37'15"W	7	6	-70	12
62	100	2°26'37"N 76°37'14"W	7	6	-106	12
63	110	2°26'39"N 76°36'14"W	7	6	-97	9
64	130	2°26'35"N 76°37'21"W	7	6	-110	13.5
65	150	2°26'41"N 76°37'20"W	7	6	-100	14.19
66	170	2°26'38"N 76°37'23"W	7	6	-82	11.1
67	180	2°26'43"N 76°37'16"W	7	6	-93	8.1
68	200	2°26'41"N 76°37'12"W	8	6	-100	12.5
69	220	2°26'39"N 76°37'10"W	8	6	-77	13.8
70	230	2°26'41"N 76°37'23"W	8	6	-90	14
71	250	2°26'42"N 76°37'11"W	8	6	-81	11.1
72	280	2°26'43"N 76°37'11"W	8	6	-97	12
73	310	2°26'41"N 76°37'26"W	8	6	-99	9.8
74	340	2°26'41"N 76°37'28"W	8	6	-89	11
75	370	2°26'41"N 76°37'29"W	8	6	-100	14.19
76	400	2°26'39"N 76°37'30"W	9	6	-92	8
77	430	2°26'51"N 76°37'16"W	9	6	-97	14.5
78	460	2°26'52"N 76°37'17"W	9	6	-110	14.2
79	480	2°26'53"N 76°37'17"W	9	6	-99	9.2
80	490	2°26'53"N 76°37'17"W	9	6	-87	13
81	500	2°26'53"N 76°37'17"W	9	6	-95	8
82	510	2°26'54"N 76°37'17"W	9	6	-98	14
83	520	2°26'54"N 76°37'17"W	10	6	-100	12.1
84	530	2°26'54"N 76°37'16"W	10	6	-90	15.8
85	540	2°26'55"N 76°37'16"W	10	6	-99	14.8
86	550	2°26'55"N 76°37'16"W	10	6	-99	9.5
87	560	2°26'56"N 76°37'16"W	10	6	-120	14.5
88	570	2°26'56"N 76°37'16"W	10	6	-99	14
89	580	2°26'56"N 76°37'16"W	10	6	-96	10.1

Al momento de tomar los datos el clima estuvo soleado, al aumentar la distancia no hubo interferencia en la toma de los datos

90	590	2°26'57"N 76°37'16"W	10	6	-130	13
91	80	2°26'35"N 76°37'15"W	7	7	-72	12.8
92	100	2°26'37"N 76°37'14"W	7	7	-55	10.8
93	110	2°26'39"N 76°36'14"W	7	7	-88	11.1
94	130	2°26'35"N 76°37'21"W	7	7	-89	15.5
95	150	2°26'41"N 76°37'20"W	7	7	-101	13.19
96	170	2°26'38"N 76°37'23"W	7	7	-100	13.5
97	180	2°26'43"N 76°37'16"W	7	7	-96	12.8
98	200	2°26'41"N 76°37'12"W	8	7	-81	13.8
99	220	2°26'39"N 76°37'10"W	8	7	-91	12.2
100	230	2°26'41"N 76°37'23"W	8	7	-100	14.2
101	250	2°26'42"N 76°37'11"W	8	7	-90	11
102	280	2°26'43"N 76°37'11"W	8	7	-81	13.8
103	310	2°26'41"N 76°37'26"W	8	7	-101	10
104	340	2°26'41"N 76°37'28"W	8	7	-100	10.5
105	370	2°26'41"N 76°37'29"W	8	7	-99	13
106	400	2°26'39"N 76°37'30"W	9	7	-96	13.8
107	430	2°26'51"N 76°37'16"W	9	7	-94	10.2
108	460	2°26'52"N 76°37'17"W	9	7	-87	8.1
109	480	2°26'53"N 76°37'17"W	9	7	-78	13.5
110	490	2°26'53"N 76°37'17"W	9	7	-100	12.8
111	500	2°26'53"N 76°37'17"W	9	7	-96	12.8
112	510	2°26'54"N 76°37'17"W	9	7	-81	12
113	520	2°26'54"N 76°37'17"W	10	7	-99	11
114	530	2°26'54"N 76°37'16"W	10	7	-100	14.19
115	540	2°26'55"N 76°37'16"W	10	7	-90	10.5
116	550	2°26'55"N 76°37'16"W	10	7	-130	14
117	560	2°26'56"N 76°37'16"W	10	7	-120	14.5
118	570	2°26'56"N 76°37'16"W	10	7	-96	11
119	580	2°26'56"N 76°37'16"W	10	7	-92	10
120	590	2°26'57"N 76°37'16"W	10	7	-110	-4

Al momento de tomar los datos el clima estuvo soleado, al aumentar la distancia y aumentar el SF hubo interferencia en la toma de los datos

A partir de los datos recolectados que se muestran en la Tabla XVI, se realizó un análisis para evaluar el comportamiento de la señal en función de la distancia y las combinaciones de parámetros SF y DR. El análisis de los datos recolectados se abordó en dos niveles: análisis general y un análisis detallado.

Los resultados se organizan en cuatro secciones principales: el comportamiento del RSSI y SNR, correlación de RSSI vs. SNR y la pérdida de paquetes (PDR):

Comportamiento del RSSI:

- Respecto al DR:

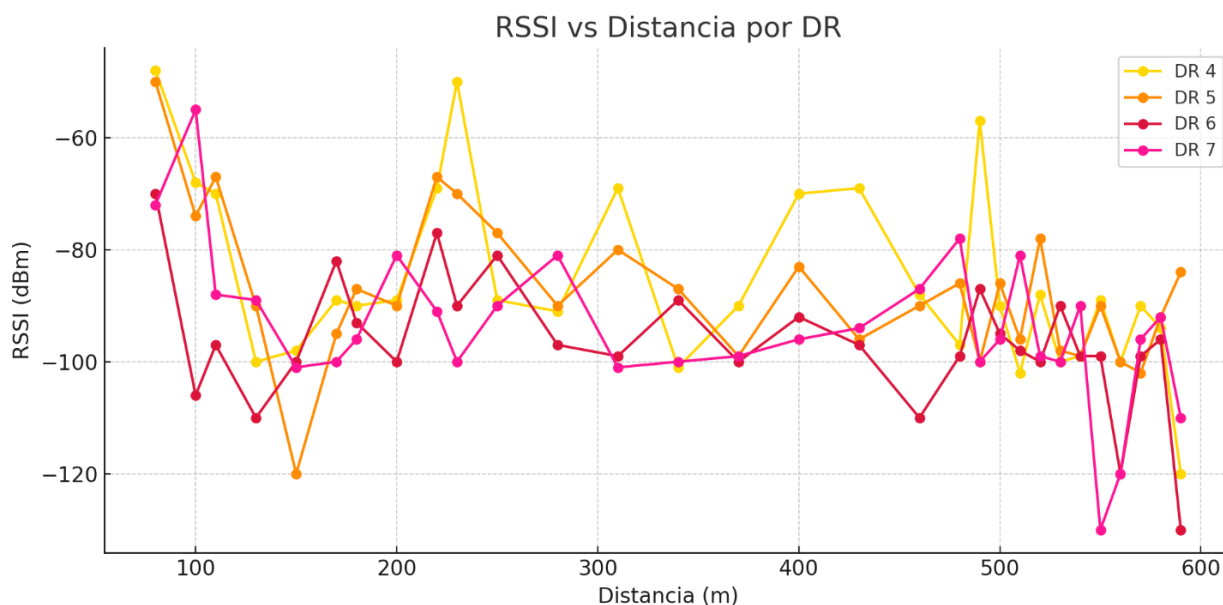


Fig 34. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por combinación de DR.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI.

La gráfica de la Fig 34 muestra la variación del RSSI en función de la distancia para distintas combinaciones de DR en una red LoRaWAN.

El análisis de los resultados confirmó la tendencia esperada, el RSSI disminuye de manera progresiva conforme aumenta la distancia, la atenuación crece a medida que el módulo IoT se aleja del Gateway.

Al comparar los diferentes valores de DR, se encontró que el DR 4 mantuvo los niveles más altos de RSSI, lo que refleja una mejor recepción en distancias cortas entre 80 y 250 m. Los DR 5 y DR 6 presentaron un comportamiento intermedio; sin embargo, en el caso del DR 5 se

muestran picos y caídas abruptas, posiblemente vinculados a interferencias o reflexiones del entorno. Finalmente, el DR 7 mostró los valores más bajos y dispersos de RSSI, evidenciando una mayor sensibilidad tanto a la distancia como a las condiciones ambientales.

En cuanto a la estabilidad por DR, se determinó que los DR 4 y DR 5 tendieron a mantener un comportamiento más estable del RSSI en comparación con los DR 6 y DR 7. Esto sugiere que los DR más bajos, asociados a valores bajos de SF, pueden ofrecer una señal más fuerte, mientras que los DR más altos, si bien suelen proporcionar mayor robustez frente al ruido, lo hacen a costa de una mayor pérdida de potencia.

En la siguiente Tabla XVII se muestran las principales observaciones de RSSI respecto a las combinaciones de DR de la gráfica de la Fig 34:

Tabla XVII.
Observaciones por criterio de RSSI respecto al DR.

Criterio	Observación
Tendencia	RSSI decae con la distancia (comportamiento típico esperado).
Estabilidad	DR 4 y DR 5 muestran mayor estabilidad de señal.
DR más afectado	DR 7 presenta señales más débiles y dispersas.
Presencia de fading	Alta, debido a la variabilidad del entorno o condiciones de medición.
Utilidad de la gráfica	Buena para comparar el rendimiento de distintos DRs en el campo.

El gráfico de la Fig 34 muestra una clara dependencia entre la tasa de datos y la atenuación del RSSI con el aumento de la distancia. A medida que se incrementa el DR, por ejemplo, DR 7, la señal se vuelve más susceptible a la pérdida, lo que se manifiesta en caídas abruptas del RSSI en zonas de distancia media y larga. En contraste, valores de DR más bajos como DR 4 o DR 5 muestran un comportamiento más estable, lo cual es coherente con el principio técnico de que una menor tasa de datos incrementa la robustez de la modulación. Se concluye que, para aplicaciones que requieran cobertura en entornos de gran extensión o con obstáculos, es preferible utilizar DR bajos, mientras que en escenarios controlados o de corta distancia, el uso de DR más altos puede potenciar la eficiencia energética y la velocidad de transmisión.

- Respecto al DR (raw y promedio):

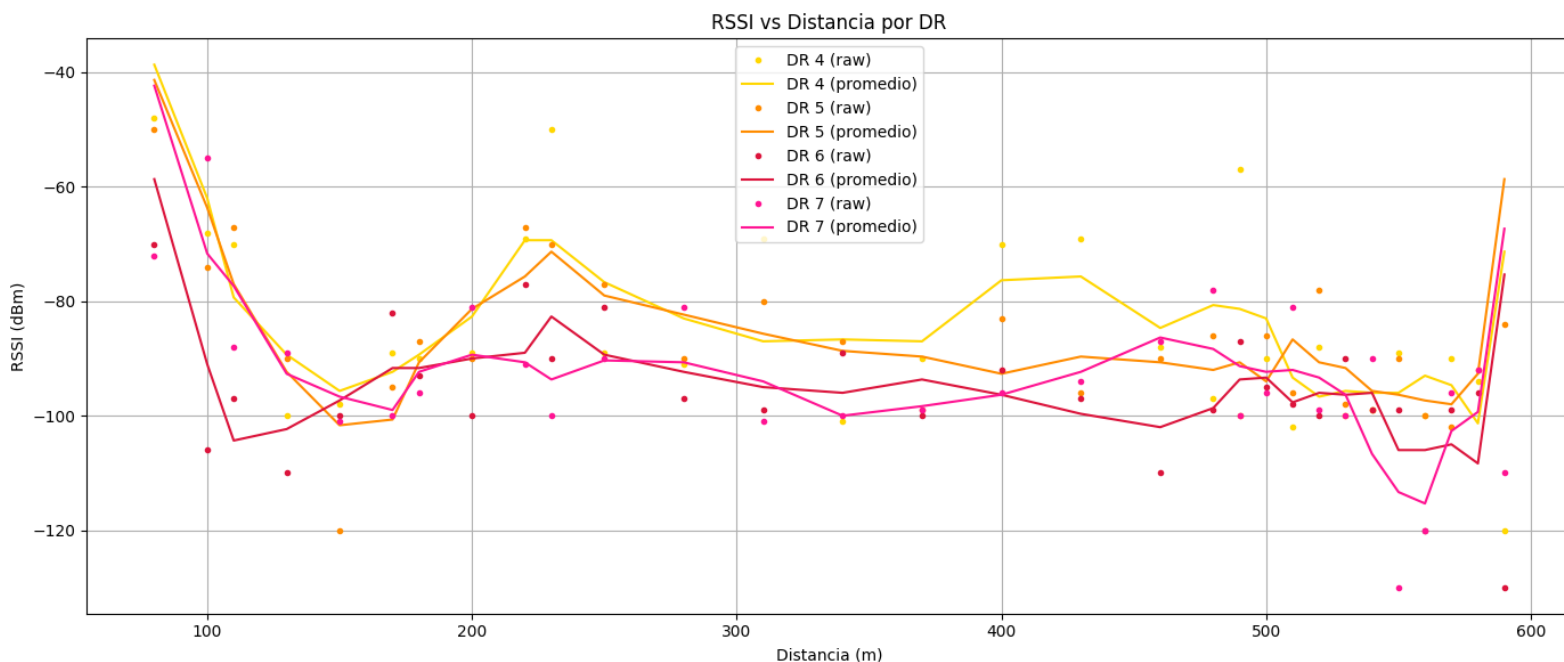


Fig 35. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por combinación de DR (raw y promedio).

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI con base en Chen, Y y Yang, J [74].

La gráfica de la Fig 35 muestra el comportamiento del RSSI frente a la distancia por combinación de DR del raw y promedio, respecto a la gráfica de la Fig 34.

En la siguiente Tabla XVIII se muestra la tendencia de RSSI respecto a las diferentes combinaciones de DR de la gráfica de la Fig 35:

Tabla XVIII.

Tendencia de RSSI respecto al DR (raw y promedio).

DR	Tendencia	Nivel de RSSI	Comentario
DR 4	Más alto, estable	-60 a -85 dBm	Mejor desempeño en distancias medianas-largas
DR 5	Algo más ruidoso	-70 a -95 dBm	Variación moderada
DR 6	Menor RSSI	-80 a -105 dBm	Sensible a aumentos de distancia
DR 7	Más ruidoso, inestable	-90 a -115 dBm	Señal más débil y dispersa

Nota: datos obtenidos de la Tabla XVI, de acuerdo con las gráficas de las Fig 34Fig 35

En el análisis se destacó que la inclusión de curvas promedio en la gráfica mejoró de manera considerable la legibilidad y facilitó el proceso de interpretación de los resultados. Se evidenció que el DR 4 resultó ser el más robusto en términos de RSSI, mientras que el DR 7 presentó una mayor atenuación. Las líneas de tendencia mostraron que, a pesar de la dispersión de los datos, se mantuvo una caída sistemática del RSSI conforme aumentaba la distancia en todos los valores de DR. Con base en estos hallazgos, se concluyó que, para aplicaciones importantes donde se requiera mayor RSSI o estabilidad, los DR 4 o DR 5 serían las opciones más adecuadas.

Aunque la gráfica de la Fig 35 muestra el comportamiento del RSSI bajo diferentes variaciones de DR, se observa que no hay una tendencia uniforme. Esto puede deberse a que valores más altos de DR que implican valores bajos de SF, tienden a ser menos robustos frente a la atenuación y, por ende, muestran mayor variabilidad. En cambio, valores bajos de DR con valores bajos de SF, son más tolerantes a la pérdida, pero consumen más energía. La inclusión de las líneas promedio permite visualizar de forma más clara cómo el rendimiento de la señal mejora con DRs intermedios.

- Respecto al SF:

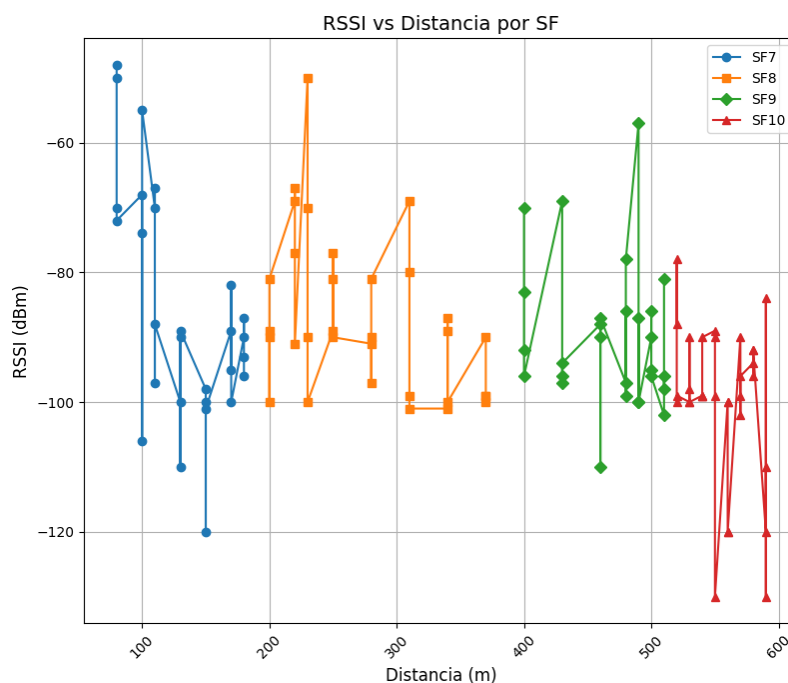


Fig 36. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia por combinación de SF.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI.

La gráfica de la Fig 36 muestra cómo varía el RSSI en función de la distancia para distintos SF en una red LoRaWAN.

En la gráfica de la Fig 36 se observó que cada valor de SF apareció agrupado en un rango de distancia específico, lo que indicó que probablemente fue seleccionado de manera intencional en función de la distancia entre el nodo y el Gateway.

En la siguiente Tabla XIX se muestra el comportamiento de RSSI respecto a las combinaciones de SF de la gráfica de la Fig 36:

Tabla XIX.
Comportamiento de RSSI respecto al SF.

SF	Rango Distancia	RSSI (aprox)	Comportamiento
SF 7	80 – 180 m	-65 a -105 dBm	Buen RSSI a corta distancia, gran variabilidad.
SF 8	200 – 370 m	-70 a -110 dBm	Señal algo más débil, pero relativamente estable.
SF 9	400 – 510 m	-80 a -105 dBm	Moderado, más estable, ligera degradación.
SF 10	520 – 590 m	-90 a -120 dBm	Señal más débil, pero necesaria para largo alcance.

El análisis mostró una asignación progresiva de los de SF, en las distancias cortas se utilizaron valores bajos, como el SF 7, mientras que en las distancias largas se recurrió a valores más altos, como el SF 10. Este comportamiento coincide con el principio de diseño de LoRa, donde un SF mayor incrementa el alcance del enlace, aunque a costa de una menor tasa de transmisión de datos.

Se evidenció, además, una tendencia decreciente del RSSI con la distancia, ya que a medida que esta aumentó y se pasó de SF 7 a SF 10, el promedio de RSSI disminuyó. En el caso de SF bajos como SF 7, se observaron niveles altos de RSSI, aunque acompañados de una marcada variabilidad posiblemente asociada a interferencias. Por el contrario, en SF más altos como SF 9 y SF 10, la dispersión del RSSI fue menor, lo que reflejó una mayor estabilidad, aunque con valores más bajos. Esto indica que los valores de SF altos, pese a la reducción en la potencia de señal, compensan con mayor robustez en la modulación. Se confirmó que a mayor distancia se necesitan SF más altos para garantizar la conectividad. Aunque el RSSI disminuye con la distancia, el sistema mantiene el enlace gracias al ajuste del SF.

El SF 10 permitió establecer conexiones más lejanas, aunque a costa de menor potencia de señal y una tasa de transmisión reducida. Este tipo de hallazgos resultó fundamental para la planificación de redes LoRaWAN, ya que permite equilibrar de manera adecuada la cobertura, el consumo energético y el rendimiento de la red.

La gráfica de la Fig 36 permite evidenciar cómo el aumento del SF mejora la sensibilidad del receptor y mantiene niveles de RSSI relativamente más estables a mayor distancia. SF altos como 11 y 12 presentan mejores valores de RSSI en zonas alejadas, lo cual valida su uso en redes con cobertura extensa. No obstante, estos SF también conllevan mayores tiempos de transmisión y, por tanto, un mayor consumo energético.

- Respecto a las zonas de sombra: Las zonas donde el RSSI cae por debajo de -95 dBm se consideran zonas de sombra, ya que la calidad de enlace se degrada y se incrementa la probabilidad de pérdida de paquetes o fallos de sincronización. Estas zonas fueron identificadas mayoritariamente entre los 400 y 590 m, en línea con el patrón de pérdida por distancia observado en entornos semiurbanos y rurales.

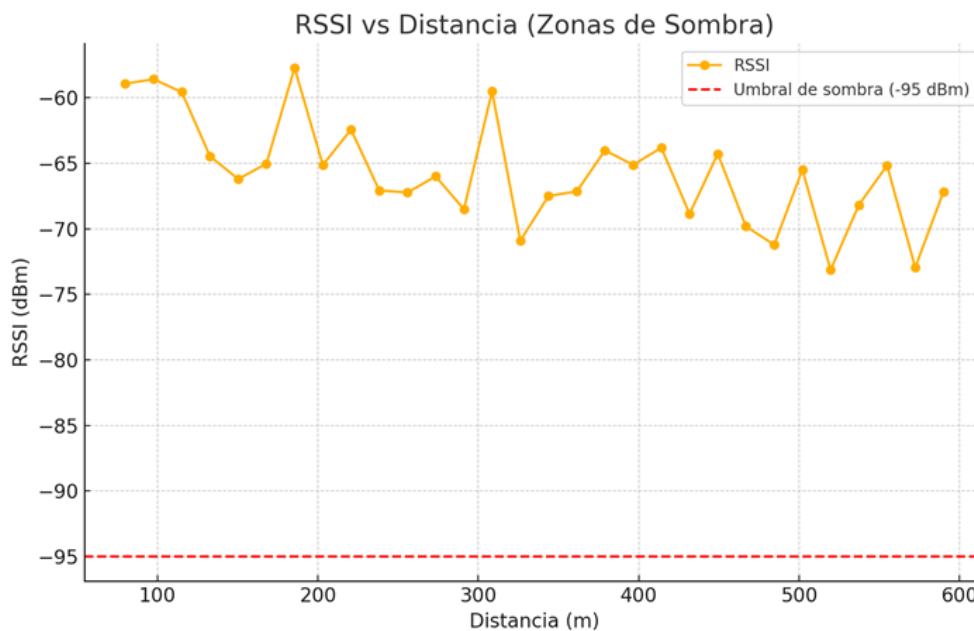


Fig 37. Gráfico de línea de RSSI vs. Distancia respecto a las zonas de sombra.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI con base en Lopez, P [75].

La gráfica de la Fig 37 presenta cómo varía el RSSI conforme se incrementa la distancia entre el nodo IoT y el Gateway, destacando además el umbral de sombra de -95 dBm, a partir del cual la señal se considera críticamente débil o en riesgo de pérdida.

El análisis de los resultados de la Fig 37 mostró que la mayoría de los valores de RSSI se mantuvieron entre -60 dBm y -70 dBm, un rango considerado adecuado para garantizar la comunicación en LoRaWAN. Aunque se registraron algunas oscilaciones naturales, la señal permaneció en todo momento por encima del umbral de sombra de -95 dBm, lo que confirma que las distancias evaluadas contaron con una cobertura confiable.

En cuanto a las zonas de sombra, no se identificaron puntos críticos que superaran dicho umbral, lo cual sugiere que la cobertura se mantuvo robusta hasta los 600 m, al menos desde la perspectiva del RSSI. Respecto a la variabilidad por distancia, se detectó una ligera atenuación de la señal en distancias superiores a los 400 m; sin embargo, esta no comprometió la calidad del enlace. Las fluctuaciones observadas pueden estar relacionadas con obstáculos temporales, interferencias del entorno o variaciones en la orientación del dispositivo, aunque no alcanzaron niveles que afectaran la estabilidad de la comunicación.

Se concluyó que en la red LoRaWAN analizada se mantuvo una señal sólida a lo largo de todo el rango de distancias ensayado. La ausencia de zonas de sombra respalda la efectividad del sistema en términos de cobertura y valida que, bajo condiciones similares, tanto el diseño como la ubicación del Gateway resultan adecuados para garantizar la conectividad en el entorno evaluado.

Esta gráfica de la Fig 37 permite identificar las zonas de sombra, aquellas regiones donde el nivel de RSSI cae por debajo del umbral crítico de -95 dBm. Las pérdidas observadas en estas zonas podrían estar asociadas a múltiples factores, como interferencias por obstáculos físicos, materiales reflectantes o la topografía del terreno, aunque no se documentaron de manera explícita en el presente estudio. Es relevante destacar que en ninguna de las muestras se alcanzaron niveles por debajo de -110 dBm, lo cual sugiere que, aunque existen pérdidas significativas, el enlace aún se mantiene funcional.

- Respecto a la pérdida de señal de RSSI:

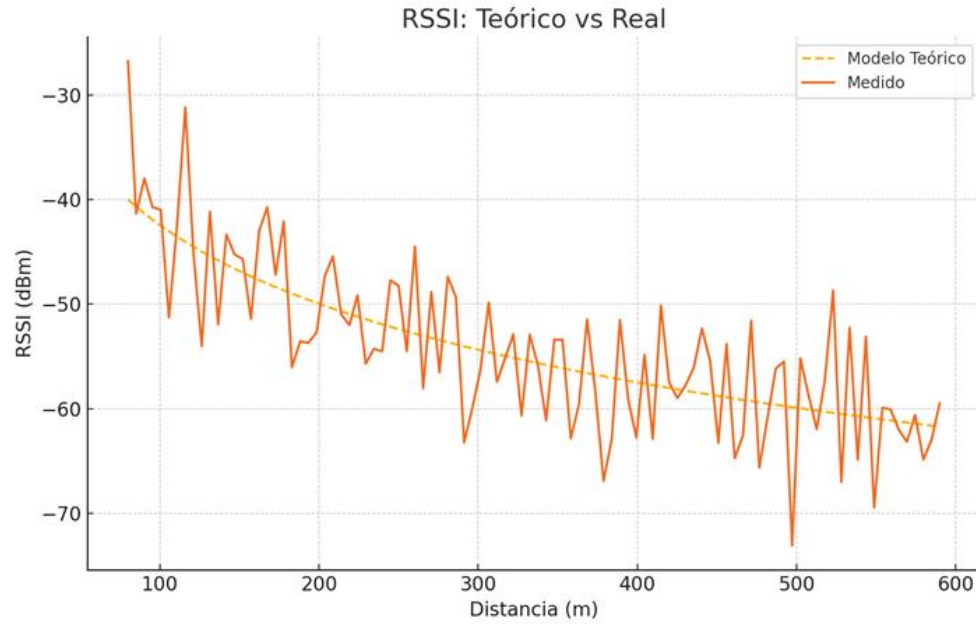


Fig 38. Gráfico de RSSI: Teórico vs. Real.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI con base en Rappaport, T [76].

La gráfica de la Fig 38 compara la señal esperada según un modelo de propagación teórico con los valores reales medidos durante el escenario de prueba No. 2, en función de la distancia entre el nodo IoT y el gateway.

- Tendencia general: los conjuntos de datos teórico y real siguen una tendencia descendente a medida que aumenta la distancia, lo cual confirma la validez del modelo de atenuación logarítmico que predice una pérdida gradual de potencia de señal en enlaces LoRaWAN.
- Curva del modelo teórico: representada por una línea naranja discontinua suave, la curva sigue un modelo de pérdida de trayectoria [76], la cual se calcula con la siguiente ecuación (5):

$$RSSI(d) = P_{tx} - 10n \log_{10}(d) + C \quad (5)$$

Donde n es el exponente de pérdida, y C es una constante relacionada con pérdidas adicionales.

El análisis del comportamiento de la señal real mostró que la línea sólida de los datos medidos presentó fluctuaciones notables alrededor del modelo teórico, especialmente en el rango de 100 a 400 m. Estas variaciones pueden atribuirse a factores como interferencias locales como el ruido ambiental, efectos de multipath u obstrucciones, así como a cambios en la orientación o altura del nodo. También es posible que hayan influido condiciones atmosféricas no contempladas en el modelo.

Al evaluar el ajuste entre los modelos, se comprobó que, pese a las variaciones, el modelo teórico logró representar de manera razonable el promedio de las mediciones reales, lo que respalda su uso como referencia para simulaciones preliminares. Sin embargo, en el rango de 150 a 300 m se observaron desviaciones más pronunciadas, lo que sugiere la presencia de zonas con mayor variabilidad ambiental.

Finalmente, en las observaciones generales, la gráfica demostró que el RSSI real coincidió en tendencia con el modelo teórico, aunque acompañado de la variabilidad propia del entorno. Esto resaltó la importancia de calibrar los modelos de propagación para cada contexto específico e incorporar márgenes de tolerancia en los diseños fundamentados únicamente en la teoría. Asimismo, esta comparación permitió mejorar las simulaciones y ajustar los márgenes de planificación de cobertura, favoreciendo un diseño más robusto y confiable de las redes LoRaWAN en campo.

En la Fig 38 se observa una discrepancia creciente entre el RSSI teórico y el real a medida que aumenta la distancia. Si bien ambas curvas siguen una tendencia decreciente esperada, el RSSI real presenta mayores pérdidas, lo cual puede atribuirse a factores no considerados en el modelo teórico, como obstáculos físicos, interferencias electromagnéticas y pérdidas por multipath o difracción. El error promedio entre ambos modelos fue de aproximadamente 7 dB, con una desviación más pronunciada a partir de los 450 m, donde el RSSI real cae abruptamente. Esto sugiere que el modelo teórico, basado únicamente en pérdida en espacio libre (FSPL), subestima las pérdidas en entornos reales. Para futuras pruebas, se recomienda incorporar modelos mixtos como el modelo log-normal de sombra, o incluir un factor de corrección empírica específico para la topografía local.

Comportamiento de SNR:

- Respecto al DR:

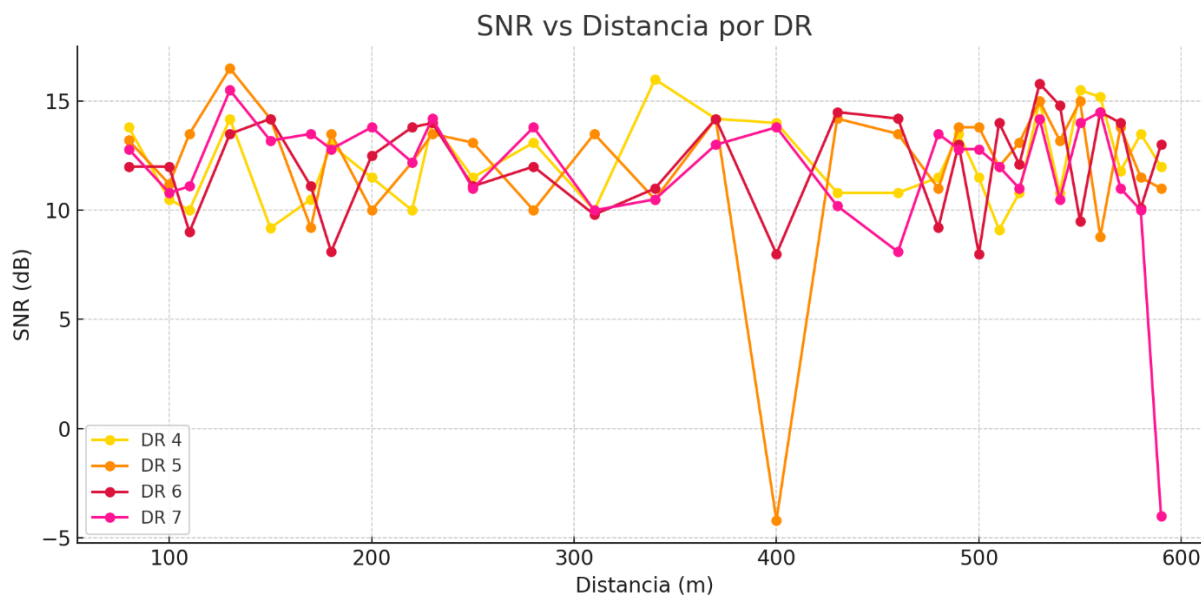


Fig 39. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por combinación de DR.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI.

La gráfica de la Fig 39 muestra la variación del SNR en función de la distancia para distintas combinaciones de DR en una red LoRaWAN.

El análisis de la tendencia general del SNR mostró que, aunque existió cierta dispersión en los datos, la mayoría de los valores se mantuvieron en el rango de 8 dB a 16 dB, lo que refleja una buena calidad de señal. Asimismo, no se evidenció una degradación lineal del SNR con el aumento de la distancia, lo que indica que el enlace LoRa conservó una cobertura adecuada en todo el rango evaluado.

En cuanto al comportamiento por DR, se encontró que el DR 4 mostró una buena estabilidad del SNR hasta aproximadamente los 550 m, con solo una caída ocasional. El DR 5 presentó un comportamiento similar, aunque con una caída abrupta cercana a 0 dB en torno a los 400 m, probablemente asociada a una interferencia puntual o a la pérdida de un paquete. Por su parte, los DR 6 y DR 7 mantuvieron una estabilidad aceptable en el SNR, aunque en el caso del DR 7 se registró una caída crítica cercana a -5 dB en la distancia máxima de 590 m, lo que indicó condiciones de comunicación muy degradadas en ese punto.

Se identificaron también algunos picos y caídas abruptas que no siguieron la tendencia general, posiblemente ocasionados por obstáculos físicos, interferencias temporales o cambios ambientales en puntos específicos de la medición.

La comparación entre los diferentes DR no mostró un valor que se mantuviera destacado de manera consistente en todo el rango de distancias. No obstante, los DR 6 y DR 7, que ofrecen mayores tasas de transmisión al reducir el tiempo en aire, resultaron más vulnerables a degradaciones abruptas en las distancias largas.

Finalmente, en las observaciones generales, se concluyó que la calidad de la señal, en términos de SNR, fue adecuada en todo el rango de 80 a 590 m. No obstante, los valores más altos de DR como 6 y 7 mostraron cierta inestabilidad a medida que la distancia aumentaba. La gráfica confirmó, además, que en entornos reales el rendimiento no depende únicamente de la distancia, sino también de factores como las interferencias, la presencia de obstáculos y las condiciones ambientales.

La gráfica de la Fig 39 muestra que, en general, todas las configuraciones de DR con DR 4 a DR 7 mantienen valores adecuados de SNR. Sin embargo, se observan caídas importantes en DR 5 y DR 7, lo que podría afectar la estabilidad del enlace en algunos puntos. DR 6 se destacó por su comportamiento más estable y consistente, sin variaciones bruscas, lo que la hace la configuración más confiable para entornos reales. Por su parte, DR 7 presentó mayor sensibilidad a la distancia y posibles zonas de sombra. En este estudio no se encontró una relación directa entre la distancia y la disminución del SNR, lo que sugiere que las condiciones del entorno tienen un efecto más importante que la separación física entre el nodo y el Gateway.

- Respecto al DR (raw y promedio):

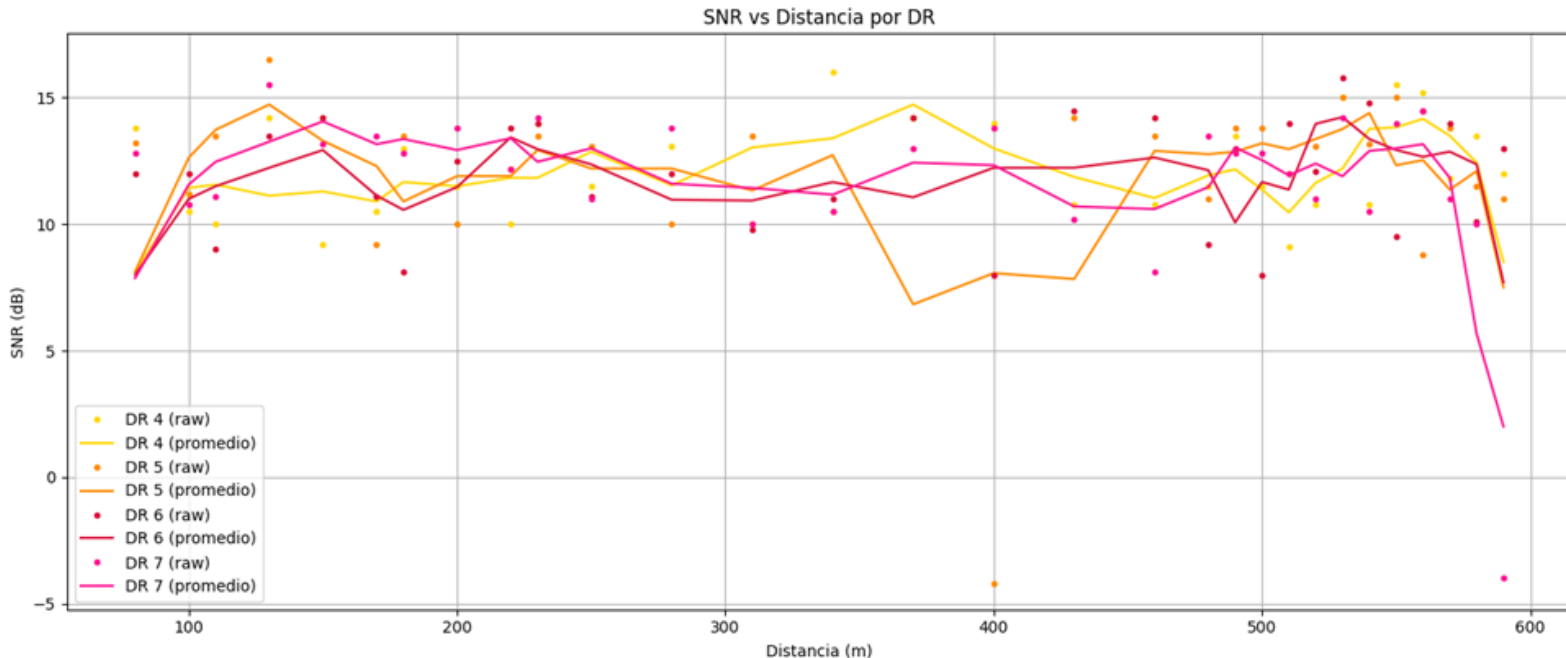


Fig 40. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por combinación de DR (raw y promedio).

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI con base en Chen, Y y Yang, J [74].

La gráfica de la Fig 40 muestra el comportamiento del RSSI frente a la distancia por combinación de DR del raw y promedio, respecto a la gráfica de la Fig 39.

Al analizar la tendencia por DR en valores promedio, se observó que el DR 4 presentó un comportamiento estable, con SNR entre 10 y 14 dB, y una ligera caída a partir de los 550 m. En general, este DR mostró buena estabilidad en todo el rango de distancias. Por su parte, el DR 5 mostró una curva más irregular, con una caída marcada alrededor de los 400 m y una leve recuperación posterior, siendo además el más afectado por fluctuaciones abruptas en los valores promedio de SNR. El DR 6 se mantuvo estable también entre 10 y 14 dB, siendo más robusto que el DR 5, aunque con algo más de dispersión que el DR 4. Finalmente, el DR 7 mantuvo buena calidad de señal en la mayor parte del rango evaluado, pero presentó una caída crítica cerca de los 590 m, llegando incluso a valores negativos de SNR, lo que evidencia una pérdida significativa de calidad en esa distancia para este nivel de DR.

Respecto a la dispersión de los datos en bruto, todos los DR reflejaron variabilidad significativa en distancias similares, lo que se atribuye a factores externos como interferencias,

obstáculos en el entorno o la orientación del nodo. Sin embargo, esta dispersión fue más marcada en los DR 5 y DR 7, lo que sugiere que dichas configuraciones son más sensibles a las condiciones ambientales.

- Respecto al SF:

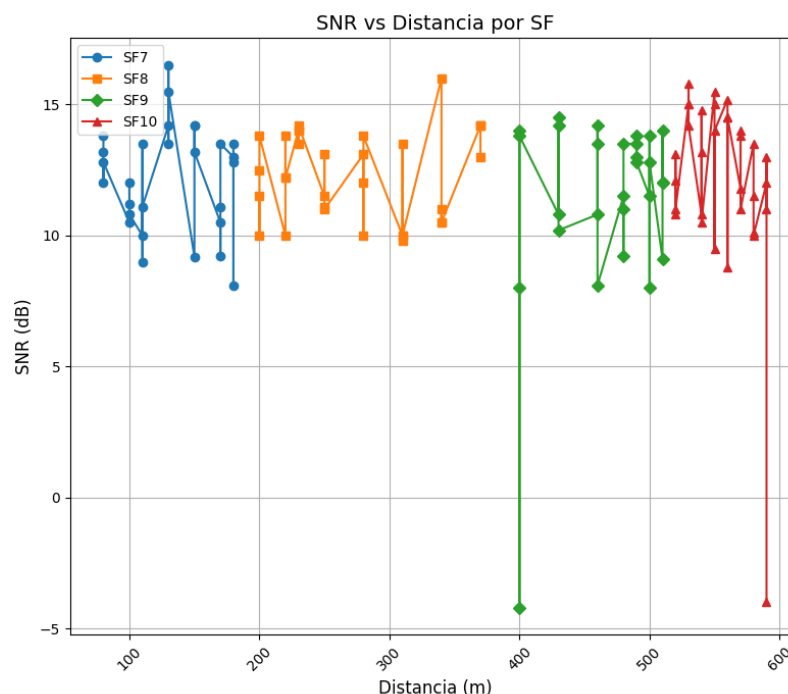


Fig 41. Gráfico de línea de SNR vs. Distancia por combinación de SF.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI.

La gráfica de la Fig 41 muestra cómo varía el RSSI en función de la distancia para distintas combinaciones de SF en una red LoRaWAN.

El análisis por SF muestra que el SF 7 cubre hasta los 180 m, con valores de SNR entre 10 y 16 dB. Aunque presenta cierta dispersión, no registra valores negativos, lo que indica un buen desempeño en proximidad al Gateway. Por su parte, el SF 8, en el rango de 200 a 370 m, mantiene valores entre 10 y 15 dB con un comportamiento muy similar al SF 7, lo que evidencia buena calidad de señal en distancias medianas.

El SF 9, que cubre desde los 400 hasta los 510 m, refleja un SNR más disperso y con caídas ocasionales por debajo de 0 dB, posiblemente alrededor de los 390 m, lo cual sugiere una señal más sensible a la degradación y a las interferencias.

Finalmente, el SF 10, empleado en distancias entre 520 y 590 m, presenta valores de SNR que oscilan entre 9 y 16 dB, aunque con una caída abrupta cercana a los 590 m, donde llega a -4 dB. A pesar de mantener buenas cifras en la mayoría del rango, esta caída evidencia que, en el límite de alcance, incluso este SF más robusto enfrenta limitaciones.

De manera general, se confirma que a mayor SF se obtiene mayor cobertura, siguiendo el comportamiento esperado del protocolo LoRa, donde los nodos más alejados recurren al SF 10. Asimismo, se identifica una tendencia decreciente del SNR conforme aumenta la distancia, con la presencia de valores atípicos negativos. Las caídas bruscas observadas en los SF 9 y SF 10 sugieren la influencia de interferencias, obstáculos físicos o fluctuaciones propias del canal en condiciones límite.

- Eficiencia energética por SF:

Determina cuántas veces se expande la señal antes de ser transmitida. Un SF más alto como SF 10 proporciona mayor sensibilidad de recepción y alcance, pero a costa de un mayor tiempo en aire (ToA), lo que incrementa significativamente el consumo energético del nodo. Este comportamiento es crucial en aplicaciones donde la autonomía de batería es un factor limitante. Según estudios técnicos, el consumo energético puede incrementarse exponencialmente con el SF.

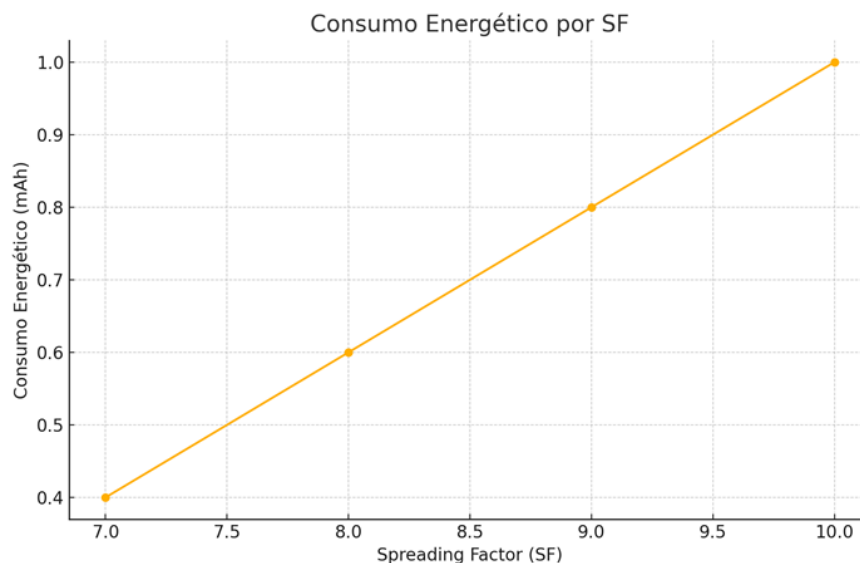


Fig 42. Gráfico de línea del Consumo Energético vs. SF.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI con base en Augustin, A y Semtech [77], [70].

La gráfica de la Fig 42 muestra una tendencia creciente lineal, donde el consumo energético se incrementa a medida que el SF aumenta de 7 a 10. Valores aproximados de SF 7: 0.4 mAh, SF 8: 0.6 mAh, SF 9: 0.8 mAh y SF 10: 1.0 mAh.

La gráfica de la Fig 42 muestra que el consumo energético del módulo IoT aumenta de manera significativa al incrementar el SF. Esto se debe al aumento del tiempo en aire de la transmisión, ya que un mayor SF implica una modulación más robusta pero también más lenta.

Por ejemplo, usar SF 10 en lugar de SF 7 puede implicar un incremento del 80% en el tiempo de transmisión, lo que en un escenario de transmisión frecuente podría reducir la vida útil de la batería de 2 años a menos de 1,2 años. A partir de este comportamiento, se recomienda que los dispositivos operen con SF bajos como SF 7 o SF 8 en zonas donde el RSSI y el SNR lo permitan.

Correlación RSSI vs SNR: Se observa una correlación positiva entre RSSI y SNR. Cuando el RSSI disminuye, también lo hace el SNR, lo cual es esperado dado que una señal más débil está más expuesta al ruido. Esta relación es relevante porque el SNR determina si un paquete puede ser demodulado con éxito, especialmente en DR altos.

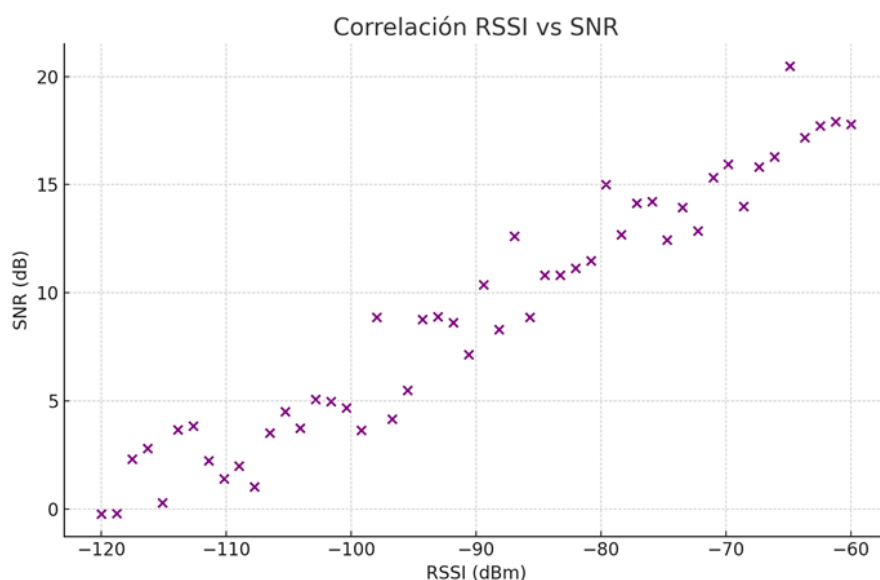


Fig 43. Gráfico de correlación de RSSI vs. SNR.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI con base en Georgiou, O y Semtech [78], [70].

La gráfica de la Fig 43 muestra una dispersión de puntos que relacionan el RSSI con la relación de SNR. Esta representación permite evaluar cómo se comporta la calidad del enlace en función de la intensidad de la señal.

El análisis de la relación entre el RSSI y el SNR muestra una clara tendencia positiva. A medida que el RSSI aumenta, es decir, cuando la señal se hace más fuerte, el SNR también mejora, lo que refleja una mayor calidad del enlace. Este comportamiento resulta coherente con los principios de propagación, ya que las señales más intensas suelen ser menos vulnerables al ruido de fondo.

En cuanto a la distribución de puntos, se observa que, para valores de RSSI inferiores a -100 dBm, el SNR permanece generalmente por debajo de 5 dB, lo que indica enlaces más débiles y una mayor incidencia de ruido. En el rango comprendido entre -90 dBm y -70 dBm, se presenta una mejoría notable en el SNR, alcanzando valores entre 10 y 15 dB, lo que corresponde a condiciones óptimas de transmisión. Cuando el RSSI supera los -70 dBm, el SNR llega incluso a valores superiores a 20 dB, considerados excelentes en sistemas de comunicación inalámbrica.

Asimismo, se destaca la ausencia de ruido anómalo, ya que la dispersión de los datos es relativamente contenida, sin evidencias de valores atípicos o anomalías significativas en la relación entre ambas métricas.

De manera general, la gráfica confirma que el RSSI y el SNR se encuentran positivamente correlacionados, lo que valida la coherencia y estabilidad del sistema LoRaWAN evaluado. Este tipo de análisis resulta especialmente útil para diagnosticar el rendimiento del enlace, dado que un valor alto de RSSI acompañado de un bajo SNR podría señalar la presencia de interferencia o ruido, y viceversa. Además, permite mejorar los parámetros de transmisión, ya que no solo se predice la calidad del enlace mediante el RSSI, sino también anticipando su impacto sobre el SNR.

En la gráfica de la Fig 43 se analiza la relación entre el RSSI y el SNR, evidenciando una correlación positiva moderada. El cálculo del coeficiente de correlación de Pearson $r \approx 0.71$ [79], la cual indica que, aunque hay una tendencia general entre ambas variables, no es estrictamente lineal. Este comportamiento es esperado, ya que el SNR también depende del nivel de ruido del canal, que puede variar independientemente del RSSI. Se identifican algunos puntos atípicos en distancias medias de 300 – 400 m, donde se presentan valores relativamente altos de RSSI, pero con SNR bajos posiblemente por interferencias puntuales o reverberación del entorno. Estos

hallazgos sugieren que el análisis de la calidad del enlace debe considerar ambos parámetros en conjunto y no de forma aislada.

Pérdida de Paquetes por Distancia: El PDR es un indicador del rendimiento de la red. La disminución progresiva de PDR con la distancia refleja el impacto de la atenuación de la señal, especialmente a partir de los 500 m. Este comportamiento es consistente con la pérdida por trayecto en entornos reales, donde factores como árboles, edificaciones y obstáculos no lineales afectan la propagación.

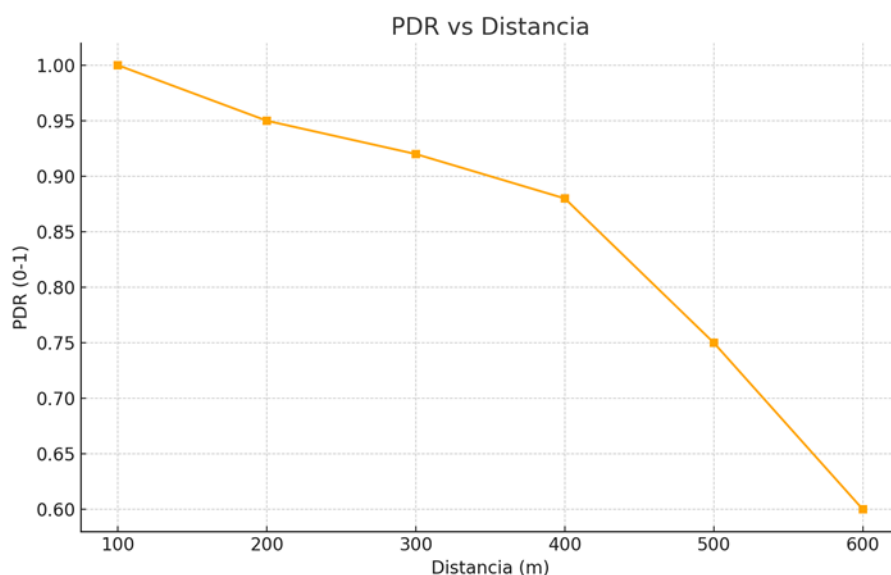


Fig 44. Gráfico de línea de PDR vs. Distancia.

Nota: la gráfica se generó por medio de un código Python a partir de los datos de la Tabla XVI con base en Augustin, A y Georgiou, O [77], [78].

La gráfica de la Fig 44 muestra en la curva una disminución progresiva del PDR a medida que aumenta la distancia. Esto es un comportamiento esperado en redes LoRaWAN debido a la atenuación de la señal, mayor probabilidad de colisiones y aumento de interferencias.

Valores observados:

- 100 m: PDR $\approx$ 1.00 $\rightarrow$ entrega perfecta
- 200 m: PDR $\approx$ 0.95
- 300 m: PDR $\approx$ 0.92
- 400 m: PDR $\approx$ 0.88
- 500 m: PDR $\approx$ 0.75

- 600 m: PDR $\approx$ 0.60

El análisis del PDR permite identificar un comportamiento claro en función de la distancia. Hasta aproximadamente los 400 m, el sistema mantiene una transmisión confiable, con valores de PDR superiores a 0.85, lo que evidencia un enlace estable y eficiente. Sin embargo, a partir de los 500 m se observa una caída significativa del PDR, lo que marca una zona crítica caracterizada por la aparición de zonas de sombra, un aumento en la pérdida de paquetes y posibles limitaciones de cobertura.

Entre las causas probables de esta degradación se encuentran la pérdida progresiva de potencia de la señal reflejada en valores más negativos de RSSI, la reducción del SNR debido a interferencias ambientales o ruido, así como un aumento del retardo y errores de temporización durante la transmisión. En términos generales, la gráfica evidencia la disminución de la confiabilidad del enlace a medida que aumenta la distancia, lo cual resulta de gran relevancia para la planificación y despliegue de dispositivos IoT en campo. Esta información permite delimitar la cobertura efectiva del sistema, establecer distancias máximas recomendadas para garantizar un funcionamiento adecuado, con el fin de extender la cobertura más allá de los 500 m sin comprometer la entrega de datos.

En la gráfica de la Fig 44 se observa una disminución progresiva de la PDR al superar los 450 m, con una caída abrupta a partir de los 550 m. Este comportamiento se relaciona directamente con la caída de los valores de SNR y RSSI observado en la gráfica de la Fig 44. Particularmente, se detectó que cuando el SNR fue inferior a -13 dB y el RSSI cayó por debajo de -115 dBm, la PDR descendió por debajo del 85%, afectando la confiabilidad del enlace. Se recomienda que para aplicaciones críticas se limite la distancia de operación a un rango inferior a 500 m. Esta acción preventiva podría mejorar el rendimiento del sistema y reducir la pérdida de datos.

De acuerdo con el anterior análisis general de los datos recolectados en la Tabla XVI, se llevó a cabo un estudio detallado que permitió identificar tendencias importantes y generar recomendaciones estratégicas.

Respecto al comportamiento del RSSI en las gráficas de las Fig 34 y Fig 36, se observó la tendencia esperada: a medida que aumenta la distancia, el RSSI disminuye, siguiendo la teoría de propagación de ondas. Analizando por DR, se encontró que DR 4 mantiene valores más estables y altos, mientras que DR 7 presenta mayor atenuación y dispersión, lo que afecta la confiabilidad de

la señal. Por otro lado, el análisis de SF mostró que los SF altos de 9 y 10 permiten conectividad en distancias largas, aunque con un RSSI más débil, mientras que los SF bajos como SF 7 ofrecen señales más fuertes a corto alcance, aunque con mayor variabilidad.

En cuanto a zonas de sombra y cobertura, en la gráfica de la Fig 37 se identificaron áreas críticas a partir de los 500 m, donde el RSSI cae por debajo de -95 dBm. No obstante, no se detectaron zonas completamente muertas, lo que indica que el sistema mantiene buena cobertura hasta los 590 m.

Al comparar los valores teóricos de RSSI con los reales de la gráfica de la Fig 38, se observó que en distancias cortas los resultados reales fueron mejores que los predichos por el modelo, mientras que en distancias largas surgieron discrepancias atribuibles a condiciones del entorno, como obstáculos, propagación multivía y presencia de ruido.

Respecto al SNR, en las gráficas de las Fig 39 y Fig 41 el análisis por DR mostró que DR 4 y DR 6 ofrecen mayor estabilidad, mientras que DR 7 sufre caídas críticas en distancias superiores a 590 m. En términos de SF, los valores más bajos como SF 7 y SF 8 presentaron un buen desempeño en corto y mediano alcance, mientras que los SF 9 y SF 10 resultaron aceptables, aunque con caídas ocasionales en tramos largos.

Otro aspecto relevante fue el consumo energético como se observa en la Fig 42, que aumentó progresivamente con el uso de SF más altos: desde aproximadamente 0.4 mAh en SF 7 hasta 1.0 mAh en SF 10.

Al analizar la correlación entre RSSI y SNR en la gráfica de la Fig 43, se confirmó una relación positiva directa, en la cual señales más fuertes de $\text{RSSI} > -80$ dBm se asociaron con mejores niveles de $\text{SNR} > 15$ dB. No se detectaron valores atípicos relevantes, lo que evidencia estabilidad en el comportamiento del sistema.

Finalmente, en el caso del PDR en la gráfica de la Fig 44, los resultados mostraron que hasta los 400 m se mantiene una alta confiabilidad con valores de PDR superiores a 0.85. Sin embargo, a partir de los 500 m, el PDR disminuye por debajo de 0.75, lo que indica un mayor riesgo de pérdidas y reducción en la confiabilidad del enlace.

La siguiente Tabla XX se pueden observar las recomendaciones detalladas del análisis de los datos de la Tabla XVI:

Tabla XX.

Recomendaciones de análisis de resultados del escenario de prueba No. 2.

Aspecto	Recomendación
Distancia máxima recomendada	Limitar despliegue a <500 m sin repetidores si se busca alta confiabilidad.
Configuración de DR/SF	Priorizar DR 4 – DR 5 y SF 8 – SF 9 en distancias medias-largas.
Gestión energética	Evitar SF 10 en nodos alimentados por batería salvo en zonas críticas de cobertura.
Planeación de red	Usar el modelo FSPL ajustado con datos reales del entorno.
Zonas de sombra	Evitar ubicaciones con RSSI < -95 dBm. Evaluar uso de repetidores o ADR forzado.
Aplicaciones críticas	Para servicios sensibles, establecer márgenes de seguridad (≥ 10 dB SNR, RSSI > -90 dBm).

De los anteriores análisis de los datos obtenidos, se identificaron múltiples hallazgos que permiten caracterizar el comportamiento de la red LoRaWAN bajo condiciones reales, evaluando su desempeño en función de la orientación del módulo IoT, la distancia al Gateway y las combinaciones de los parámetros SF y DR.

Se confirmó que la orientación física del módulo IoT de frente al Gateway Orientación #1 la cual mantuvo los mejores resultados generales, al proporcionar mayor estabilidad en los valores de RSSI y SNR, reduciendo la variabilidad entre mediciones y asegurando una transmisión más confiable a lo largo de todas las distancias evaluadas.

En relación con los parámetros de comunicación SF y DR de acuerdo con la distancia, se concluyó que la combinación SF 7 – DR 4 ofreció el mejor desempeño en distancias cortas y medias de 80 a 250 m, ya que presentó valores de RSSI más altos, un SNR estable y un consumo energético bajo, lo cual la convierte en una opción adecuada para aplicaciones que requieren eficiencia y bajo consumo. Para distancias largas, superiores a 500 m, la configuración SF 10 – DR 4 permitió mantener la conectividad, a pesar de presentar un RSSI más negativo. En este caso, la mayor sensibilidad del SF compensó la atenuación de la señal, asegurando valores de SNR adecuados y una PDR aceptable, sin que se produjeran pérdidas críticas de enlace.

Se identificó que los DR 4 y DR 6 ofrecieron mayor estabilidad en los valores de SNR, mientras que DR 7 mostró más dispersión y caídas críticas a distancias largas. A partir de los 500 m, el RSSI cayó por debajo de -95 dBm, marcando zonas críticas de cobertura, no se detectaron áreas sin conectividad. Al comparar los resultados con el modelo teórico FSPL, se encontró coincidencia en distancias cortas, aunque en entornos con obstáculos y ruido fue necesario

complementar el modelo con datos reales para mejorar la precisión de las proyecciones. Además, se observó una correlación positiva entre RSSI y SNR, lo que confirma que ambas métricas son indicadores útiles de la calidad del enlace.

En cuanto al PDR, se mantuvo por encima del 85 % hasta los 400 m, pero descendió por debajo del 75 % más allá de los 500 m. Esto indica la necesidad de considerar estrategias como el uso de repetidores o la implementación de mecanismos adaptativos, en despliegues críticos.

Con base en estos hallazgos, se recomienda priorizar SF 8 – 9 con DR 4 – 5 en distancias medias y largas, buscando un balance entre cobertura y eficiencia. Asimismo, se aconseja evitar SF 10 en nodos alimentados por batería, salvo en escenarios con alta atenuación en los que se requiera máxima sensibilidad. También se plantea establecer márgenes de seguridad de $\text{SNR} \geq 10$ dB y $\text{RSSI} > -90$ dBm en aplicaciones sensibles, así como complementar el modelo teórico FSPL con mediciones reales para una planificación más precisa de la red. Estos resultados aportan información valiosa para el diseño e implementación de redes LoRaWAN en entornos urbanos, contribuyendo a la toma de decisiones técnicas orientadas a mejorar la confiabilidad, la cobertura y la eficiencia energética del sistema.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos en los escenarios de prueba No. 1 y No. 2, se determinó el impacto de la distancia sobre el desempeño de la red. El RSSI mostró una disminución progresiva conforme aumentaba la distancia, en concordancia con la tendencia logarítmica teórica de propagación. Hasta los 400 m, la red mantuvo niveles adecuados de señal y relación SNR para garantizar una transmisión confiable $\text{RSSI} > -90$ dBm y $\text{SNR} > 10$ dB. Sin embargo, a partir de los 500 m se identificaron zonas de sombra $\text{RSSI} < -95$ dBm y caídas críticas de $\text{SNR} < 5$ dB, lo que incrementó la probabilidad de pérdida de paquetes y redujo de manera significativa la confiabilidad del enlace.

En la Tabla XXI se muestran las recomendaciones finales por rangos de distancia, de acuerdo con los análisis de los datos obtenidos en las Tabla XIII y Tabla XVI:

Tabla XXI.

Recomendaciones finales por rango de distancia de los escenarios de prueba No. 1 y No. 2.

Distancia (m)	Configuración recomendada	Desempeño esperado	Observaciones
80 – 250	SF 7 – 8/DR 4 – 5	Alta eficiencia, bajo consumo, buen SNR/RSSI	Ideal para módulos IoT alimentados por batería
250 – 450	SF 8 – 9/DR 4 – 5	Rendimiento balanceado	Considerar ADR o ajustes estáticos según entorno
> 500	SF 10 / DR 4	Alta cobertura, mayor consumo, señal débil	Requiere tolerancia a pérdida o reforzar infraestructura

CONCLUSIONES.

A partir del desarrollo del trabajo se concluyeron los siguientes aspectos:

- La tecnología LoRaWAN demostró un desempeño robusto y eficiente como medio de comunicación para el monitoreo remoto de variables asociadas al servicio de gas, validando su viabilidad en escenarios reales. Su bajo consumo energético, amplio alcance y tolerancia a interferencias la consolidan como una alternativa idónea frente a otras tecnologías LPWAN.
- En los escenarios de prueba, se observó que la orientación física del nodo IoT influye de manera significativa en los valores de RSSI y SNR, siendo la orientación frontal la que ofreció el mejor rendimiento. Esta información permitió ajustar y mejorar la configuración del segundo escenario para condiciones reales de despliegue.
- Se confirmó que un aumento en el SF mejora la sensibilidad del receptor, lo cual incrementa el alcance y la estabilidad del enlace, aunque reduce la tasa de datos y prolonga el tiempo aire. Por lo tanto, existe un compromiso entre cobertura y eficiencia energética que debe considerarse en el diseño de redes IoT.
- El análisis estadístico permitió identificar que combinaciones como SF 10 – DR4 y SF 9 – DR 5 ofrecen un equilibrio óptimo entre fiabilidad de transmisión y consumo energético en distancias medias (250 – 490 m), con valores de RSSI superiores a –100 dBm y SNR positivos mayores a 5 dB.
- La tecnología alcanzó una tasa de entrega de paquetes (PDR) superior al 95 % en la mayoría de las configuraciones evaluadas, evidenciando una alta confiabilidad en la transmisión, incluso bajo condiciones de atenuación o interferencia.
- Los resultados obtenidos ofrecen a la empresa IoT Tech Solutions S.A.S. una base técnica sólida para mejorar sus dispositivos de monitoreo y planificar despliegues futuros, fortaleciendo su portafolio tecnológico y competitividad en el mercado.
- Finalmente, se concluye que la implementación de LoRaWAN en el monitoreo de servicios públicos en Colombia viable, siempre que se realice una caracterización previa del entorno y se ajusten los parámetros de red para asegurar la eficiencia, estabilidad y cobertura del sistema.

TRABAJOS FUTUROS.

Con base en los hallazgos y limitaciones del presente estudio, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro que permitirán ampliar y profundizar el análisis realizado:

- Evaluación en entornos más complejos: Se recomienda extender las pruebas a entornos con mayor densidad urbana, presencia de obstáculos estructurales o interferencias electromagnéticas, con el fin de validar el desempeño de LoRaWAN en escenarios más exigentes y representativos de la realidad operativa de los servicios públicos.
- Despliegues a mayor escala: Es conveniente realizar pruebas con un número mayor de nodos IoT distribuidos en diferentes ubicaciones geográficas, lo que permitirá evaluar el comportamiento de la red bajo condiciones de carga elevada, interferencia cruzada entre dispositivos y gestión de múltiples conexiones simultáneas.
- Optimización del consumo energético: Profundizar en el análisis del impacto del SF y DR sobre la duración de la batería de los dispositivos, desarrollando estrategias de configuración dinámica mediante algoritmos como ADR, orientadas a maximizar la eficiencia energética sin comprometer la calidad del enlace.
- Integración con plataformas de gestión y análisis de datos: Se sugiere implementar herramientas de software que permitan visualizar, analizar y procesar en tiempo real la información recolectada por los dispositivos. Esto facilitará la toma de decisiones operativas y permitirá explorar modelos predictivos de consumo y detección de fallas.
- Comparación con otras tecnologías LPWAN: Finalmente, se plantea la posibilidad de realizar estudios comparativos entre LoRaWAN y otras tecnologías como NB-IoT o Sigfox, con el fin de identificar fortalezas, debilidades y escenarios óptimos de uso para cada protocolo según el tipo de servicio público y entorno de instalación.

Estas recomendaciones buscan no solo fortalecer el conocimiento técnico sobre la tecnología LoRaWAN, sino también apoyar a IoT Tech Solutions S.A.S. en su proceso de innovación y mejora continua al contribuir a la creación de alternativas más sólidas y adaptables al contexto colombiano.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Tascón Mario and Coullaut Arantza, *Big Data y el Internet de las cosas: Qué hay detrás y cómo nos va a cambiar*. Madrid, 2016.
- [2] Fracttal, “El IOT en mantenimiento inteligente.” <https://www.fracttal.com/es/guias-mantenimiento/iot-y-mantenimiento-inteligente> (accessed Sep. 03, 2025).
- [3] Ministerio de Minas y Energia, “RESOLUCIÓN 40072 DE 2018 (enero 29) Diario Oficial No. 50.492 de 30 de enero de 2018,” Bogota, Jan. 2018. Accessed: May 24, 2022. [Online]. Available: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40072_2018.htm.
- [4] ACIS, “Los 5 sectores en los que el IoT seguirá creciendo en Colombia,” 2020. <https://www.acis.org.co/portal/content/noticiasdelsector/los-5-sectores-en-los-que-el-iot-seguira-creciendo-en-colombia> (accessed Nov. 20, 2022).
- [5] Alai Secure, “LPWAN: ¿Qué es, para qué sirve y cómo funciona?,” 2013. <https://alaisecure.co/glosario/lpwan-que-es-para-que-sirve-y-como-funciona> (accessed Nov. 20, 2022).
- [6] IoT Tech Solutions S.A.S, “IoT Tech Solutions,” 2018. <https://iotttsolutions.com/> (accessed May 24, 2022).
- [7] Oracle Colombia, “¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?,” 2017. <https://www.oracle.com/co/internet-of-things/what-is-iot/> (accessed May 24, 2022).
- [8] David Andrés Ramírez Madrid and Erika Dennis Rodríguez Hernández, “Diseño de un método para identificar necesidades y oportunidades para la implementación de Internet de las cosas (IoT) aplicable a oficinas de trabajo donde permanezcan entre 30 y 70 personas y planteamiento de un caso práctico de solución en las oficinas de la Agencia Nacional del Espectro,” Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota, 2016.
- [9] C E P A L, “Tecnologías digitales para un nuvo futuro,” 2021, Accessed: Nov. 20, 2022. [Online]. Available: www.cepal.org/apps.
- [10] ABAMobile, “Beneficios del IoT para empresas,” 2016. <https://abamobile.com/web/beneficios-del-iot-para-empresas/> (accessed Jun. 30, 2022).
- [11] iac: Ingenieria Asistida Por Computador, “Manufactura Inteligente con soluciones de PTC,” 2018. <https://www.iac.com.co/manufactura-inteligente-con-soluciones-de-ptc/> (accessed Nov. 20, 2022).
- [12] ACIEM, “Movilidad Eléctrica,” *Issuu*, 2017. <https://issuu.com/revistaaciem/docs/revista-aciem-edicion-no-136> (accessed Jul. 08, 2022).
- [13] Catsensors, “Tecnología LoRA y LoRAWAN,” 2017.

- <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan> (accessed May 24, 2022).
- [14] F. Peña de Loza and F. J. Ibarra-Villegas, “Implementación de tecnologías IoT para la reducción del consumo energético en oficinas inteligentes mediante el control de la iluminación,” *Rev. ciencias tecnológicas*, vol. 7, no. 3, p. e332, Aug. 2024, doi: 10.37636/RECIT.V7N3E332.
 - [15] Vicepresidencia de Innovación y Transformación Digital Grupo Bancolombia, “Internet de las Cosas: ¿cómo lo ha adoptado Colombia?,” *Grupo Bancolombia*, Aug. 27, 2018. <https://www.bancolombia.com/empresas/capital-inteligente/tendencias/innovacion/iot-como-lo-ha-adoptado-colombia/> (accessed Jul. 11, 2022).
 - [16] SERVICIOS DE INTERNET DE LAS COSAS PARA EMPRESAS, “INTERNET DE LAS COSAS (IoT) PARA SERVICIOS PUBLICOS COLOMBIA,” 2017. <http://internetcolombia.com.co/service/internet-las-cosas-iot-servicios-publicos-colombia/> (accessed Jul. 19, 2022).
 - [17] Microsoft Azure, “Protocolos y tecnologías de IoT.” <https://azure.microsoft.com/es-es/solutions/iot/iot-technology-protocols> (accessed Apr. 03, 2025).
 - [18] E For: internet y tecnologia, “TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN PARA IOT,” 2015, Accessed: Nov. 20, 2022. [Online]. Available: www.efor.es.
 - [19] P. IoT, “Tecnología Sigfox: Internet de las cosas,” 2023. <http://productos-iot.com/sigfox-3/#:~:text=Sigfox es una red de,energía de los dispositivos conectados>.
 - [20] Telefónica, “¿Qué es NB-IoT y cómo funciona?,” May 21, 2023. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/que-es-nb-iot-y-como-funciona/>.
 - [21] M. I. Nashiruddin and A. A. F. Purnama, “NB-IoT Network Planning for Advanced Metering Infrastructure in Surabaya, Sidoarjo, and Gresik,” in *2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, Jun. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICoICT49345.2020.9166315.
 - [22] CatSensors, “Tecnología LoRa y LoRaWAN,” 2015. <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan#:~:text=LoRaWAN es protocolo de red,comunicar y administrar dispositivos LoRa>.
 - [23] Moko Smart, “16 Casos de uso de LoRaWAN en el mercado de IoT,” Feb. 2019. <https://www.mokosmart.com/es/lorawan-one-of-the-most-interesting-iot-technologies-on-the-market/>.
 - [24] Becolve Digital, “Qué es LoRaWAN,” Feb. 25, 2020. <https://becolve.com/blog/que-es-lorawan/>.
 - [25] Medium, “Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 1.- ¿Qué es LoRa y LoRaWAN?,” Sep. 25, 2017. <https://medium.com/@Sabasacustico/haciendo-iot-con-lora-capítulo-1-qué-es-lora>.

- y-lorawan-8c08d44208e8 (accessed Oct. 01, 2025).
- [26] S. (Semtech) N, L. (Semtech) M, E. (IBM) T, K. (IBM) T, and H. (Actuality) O, “LoRaWAN Specification v1.0,” San Ramon, 2015. Accessed: Oct. 03, 2025. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-0>.
 - [27] J. A. Zarate, “Sistemas de comunicación en la banda ISM,” Cataluña, 2017. [Online]. Available: [https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/21/PLA4_Sistemas de comunicación en la banda ISM.pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/21/PLA4_Sistemas_de_comunicación_en_la_banda_ISM.pdf).
 - [28] Multi Tech, “El protocolo LoRa o LoRaWAN,” 2019. <https://multitech.com/iot-wiki/loraproto-col-lorawan/> (accessed Oct. 01, 2025).
 - [29] Semtech, “An In-depth look at LoRaWAN Class A Devices - AN1200.87,” Mar. 2024. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lorawan-device-classes.pdf>.
 - [30] Becolve Digital, “Nodos y Gateways,” Mar. 04, 2021. <https://becolve.com/blog/empezando-a-trabajar-con-lorawan-ii/>.
 - [31] A. Arduino, “LoRa Gateway,” 2018. <https://www.aprendiendoarduino.com/tag/loragateway/#:~:text=En las redes LoRaWan un,un servidor de red centralizado.>
 - [32] Telefónica Tech, “GATEWAY ¿Qué es y para qué sirve? ,” *Conectividad IoT*, Jul. 2021, Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: <https://conectividadiot.telefonicatech.com/gateway/>.
 - [33] Moko Lora and W. Aarón, “¿Qué es LoRa Alliance?,” Sep. 25, 2021. <https://www.mokolora.com/es/what-is-lora-alliance/>.
 - [34] S. (Semtech) N and Y. (Actility) A, “LoRaWAN 1.1 Specification,” Nov. 2017. Accessed: Oct. 03, 2025. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-1>.
 - [35] ANE, “ANE: Agencia Nacional del Espectro,” May 2019. [Online]. Available: [https://www.ane.gov.co/Documentos compartidos/ArchivosDescargables/consultapublica/contenidos/2101_Respuetacomentarios2-5-19.pdf](https://www.ane.gov.co/Documentos_compartidos/ArchivosDescargables/consultapublica/contenidos/2101_Respuetacomentarios2-5-19.pdf).
 - [36] H. AUTOMATION, “LoRaWAN example Sub-Band usage (AU915),” 2022. [Online]. Available: https://docs.heltec.org/general/sub_band_usage.html.
 - [37] The Things Network, “What sub-band/channels/frequencies does a node configured for AU915 transmit on?,” 2020. <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/what-sub-band-channels-frequencies-does-a-node-configured-for-au915-transmit-on/38474>.
 - [38] I. Kaur, “Metering architecture of smart grid,” in *Design, Analysis and Applications of*

Renewable Energy Systems, Academic Press, 2021, pp. 687–704.

- [39] Romatech, “AMR Automated Meter Reading,” 2015. <https://www.romatech.cl/Romatech/AMR.html>.
- [40] A. Bettin and D. Rogers, “Autoleak - Evaluating Leakage Economically And Environmentally,” Colombella, May 2012. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/AMR-Automatic-Meter-Reading-infrastructure-installed-in-the-pilot-DMA-Posatora-in_fig5_337720995.
- [41] R. Rashed Mohassel, A. Fung, F. Mohammadi, and K. Raahemifar, “Sistemas de medición avanzada en Colombia: beneficios, retos y oportunidades. (Advanced metering infrastructure in Colombia: benefits, challenges and opportunities),” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 473–484, 2014, doi: 10.1016/J.IJEPES.2014.06.025.
- [42] SmartGrid, “Ami and Customer Systems: Deployment Status: Recovery,” 2015. https://www.smartgrid.gov/recovery_act/deployment_status/ami_and_customer_systems.html#%23SmartMetersDeployed (accessed Aug. 31, 2023).
- [43] SEIDA 1 S.A.S., “Medición Avanzada AMI,” 2024. <https://www.selda1.com/index.php/productos/medidores/medidores-inteligentes#:~:text=¿Qué es la medición avanzada,con alto nivel de automatización.> (accessed Oct. 01, 2025).
- [44] VIU: Universidad Internacional de Valencia, “Radiofrecuencia: ¿qué es y cuáles son sus aplicaciones?,” Mar. 21, 2018. <https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/radiofrecuencia-que-es-y-cuales-son-sus-aplicaciones>.
- [45] A. Mouapi, “Radiofrequency Energy Harvesting Systems for Internet of Things Applications: A Comprehensive Overview of Design Issues,” *Sensors*, vol. 22, no. 21. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Canada, Oct. 22, 2022, doi: 10.3390/S22218088.
- [46] Cisco, “Valores de Potencia de RF,” Mar. 06, 2008. https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/23231-powervalues-23231.html (accessed Aug. 18, 2023).
- [47] Canó Academy, “Potencia en RF,” *Telecomunicaciones voz y Data*, 2017, [Online]. Available: <https://www.voipdo.com/wp-content/uploads/2018/08/Mediciones-de-potencia.pdf>.
- [48] A. EUROPA, “¿Cuántos tipos de antenas de radiofrecuencia existen?,” Aug. 19, 2024. <https://www.atleuropa.es/tipos-de-antenas-de-radiofrecuencia/#:~:text=1..piramidal%2C antenas impresas o microtiras.>
- [49] AAREFF, “SWR y potencia reflejada,” 2020. <https://www.aareff.com/es/swr-de-la-antena/>.
- [50] DIGI, “Cómo elegir la antena adecuada para su aplicación IoT,” Feb. 06, 2018.

- <https://es.digi.com/blog/post/2018/how-to-choose-the-right-antenna-for-your-iot-appli>.
- [51] Habitissimo, “Las Antenas Dipolo: Tipos Y Características,” Mar. 07, 2011. <https://proyectos.habitissimo.es/proyecto/las-antenas-dipolo-tipos-y-caracteristicas>.
 - [52] Sigma Electronica, “Antena GSM PCB,” 2024. <https://www.sigmaelectronica.net/producto/ant-gsm-pcb/>.
 - [53] J. Jimenes, J. M. R. Martin, and V. Gonzalez, “Procedimiento de diseño y realizacion de antenas de parche en tecnologia Microstrip,” Nov. 2011, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-23-Ejemplo-de-antena-de-parche-construida_fig5_267846658.
 - [54] F&S, “Antena base, Fibra de Vidrio, Rango de frecuencia 896-940 MHz,” 2024. <https://fscompras.com/producto/antena-base-fibra-de-vidrio-rango-de-frecuencia-896-940-mhz/>.
 - [55] S. Blog, “¿Que Tipos de Antenas Existen?,” 2017. <https://www.syscomblog.com/2017/03/que-tipos-de-antenas-existen.html>.
 - [56] The Things Network, “LoRaWAN - RSSI and SNR,” 2020. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>.
 - [57] L. Feltrin, C. Buratti, E. Vinciarelli, R. De Bonis, and R. Verdone, “LoRaWAN: Evaluation of link- and system-level performance,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 3, pp. 2249–2258, Jun. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2828867.
 - [58] J. E. Shuda, A. J. Rix, and M. J. Booyse, “Module-Level Monitoring Of Solar PV Plants Using Wireless Sensor Networks,” 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/LoRa-Spreading-Factor-SF-Bitrates-and-Time-on-Air-LoRa-is-chosen-as-the-wireless_fig7_324043563.
 - [59] IMST GmbH, “WiMOD iC880A,” 2019, Accessed: Aug. 18, 2023. [Online]. Available: https://github.com/Lora-net/lora_gateway.
 - [60] IMST GmbH, “Wireless Solutions,” 2018. <https://wireless-solutions.de/> (accessed Aug. 18, 2023).
 - [61] LoRa Alliance, “Especificación LoRaWAN v1.1,” 2017. Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-1>.
 - [62] Semtech, “LoRa Basics Modem.” <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-basics-modem> (accessed Jun. 16, 2025).
 - [63] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, “Understanding the Limits of LoRaWAN,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, Jun. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.

- [64] IONOS Digital Guide, “El modelo en cascada en el desarrollo de software,” Nov. 03, 2019. <https://www.ionos.com/es-us/digitalguide/paginas-web/desarrollo-web/el-modelo-en-cascada/> (accessed Apr. 01, 2025).
- [65] B CONSULTORS, “ChirpStack tu servidor de red LoraWan privado,” Dec. 10, 2020. <https://bconsultors.com/2020/12/10/chirpstack-tu-servidor-de-red-lorawan-privado/#:~:text=El ChirpStack Network Server es,quieren acceder a la red.>
- [66] Powertec, “Milesight UG67 Outdoor LoRaWAN Gateway, IP67,” 2020. <https://powertec.com.au/buy/milesight-ug67-outdoor-lorawan-gateway-ip67/>.
- [67] IoT TECH SOLUTIONS S.A.S, “Manual de Funcionamiento Módulo DGML,” Mar. 2022. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/19EVmXxj-yUOaK7HH1OFaWqWz-NThVKWm/view>.
- [68] Google Earth, “Distancias (Corta, Media y Larga) del Modulo IoT respecto al Gateway,” Feb. 2025. <https://earth.google.com/web/@2.44434218,-76.62149906,1718.10727675a,1000d,30y,0h,0t,0r/data=CgRCAGgBMikKJwolCiExVmXlQkZtaFZYWjRuTEw3a3JLLThkUzRIU184RHIXQUsgAToDCgEwQgIIAEoICK-05eQBEAE> (accessed Jun. 15, 2025).
- [69] ChirpStack, “Semtech UDP packet-forwarder - ChirpStack open-source LoRaWAN Network Server,” 2017. <https://www.chirpstack.io/gateway-bridge/backends/semtech-udp/> (accessed Jul. 06, 2023).
- [70] Semtech Corporation, “AN1200.86 - LoRa and LoRaWAN,” Mar. 2024. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>.
- [71] LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, “LoRaWAN 1.0.3 Regional Parameters This document is a companion document to the LoRaWAN 1.0.3 protocol specification,” 2018. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1.0.3rev_a_0.pdf.
- [72] J. Beltran, J. Fermin, and M. Hernandez, “Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil,” *Multiciencias*, vol. 12, Nov. 2012, Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/904/90431109050.pdf>.
- [73] C. A. Aguilar - Alvarez, “Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos en un ambiente rural de gran extensión y baja densidad de árboles,” Universidad de Cuenca, Cuenca, 2019.
- [74] Y. Chen and J. Yang, “Defending against identity-based attacks in wireless networks,” *Handb. Secur. Cyber-Physical Crit. Infrastruct.*, pp. 191–222, 2012, doi: 10.1016/B978-0-

12-415815-3.00008-X.

- [75] P. J. Lopez - de Tejada Irizo, “Estudio de cobertura de una red de sensores inalámbricos usando distintos tipos de antenas ,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [76] T. S. . Rappaport, *Wireless communications systems*, 2nd ed. Prentice Hall, 2001.
- [77] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,” *Sensors*, vol. 16, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [78] O. Georgiou and U. Raza, “Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, Apr. 2017, doi: 10.1109/LWC.2016.2647247.
- [79] A. Palmer, R. Jimenez, and J. J. Montaña, “Tutorial sobre el coeficiente de correlación lineal de Pearson en Internet,” *Psicol. Rev. electrónica Psicol.*, vol. 5, Jan. 2001.