

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Mecanismos de optimización para el uso de redes LPWAN en industria

6 de agosto de 2025

Autor: David Todolí Ferrandis

Directores: Dr. Víctor Miguel Sempere Payá

Dr. Javier Lidiano Silvestre Blanes

A mi esposa Ania y mi hijo Teo, que me acompañan e impulsan a ser mejor cada día.

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A mis directores Víctor y Javier por la dedicación y apoyo inestimable para que esta tesis sea hoy una realidad.

A mis compañeros de equipo, por ayudarme día a día.

Y en especial a mí padre, que me dedicó su tiempo y su esfuerzo con tal de educarme y formarme lo mejor posible para afrontar la vida.

Resumen

Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), en particular las soluciones relacionadas con el IoT (Internet de las cosas), están jugando un papel fundamental para aumentar la eficiencia, reducir el impacto ambiental y simplificar y automatizar las tareas. La innovación en el dominio de IoT avanza rápidamente, por lo que acomodar una cantidad cada vez mayor de dispositivos que requieren conexión a una red es un tema fundamental que abordar. Dicha expansión de la red no debe tener el costo de la QoS (calidad de servicio) o la entrega de mensajes, especialmente cuando se trata de casos críticos de uso industrial.

Una solución orientada a la inmunidad a las interferencias es crucial para superar los problemas de escalabilidad de IoT para una operación de red confiable en un espectro saturado. Con la tecnología de radio sub-GHz, las redes IoT se pueden segregar de otros sistemas heredados de 2,4 GHz para mitigar los problemas de fluctuación y congestión, al tiempo que se benefician de otras características de LPWAN (redes de área amplia de baja potencia) como el rango de larga distancia, el bajo consumo de energía y el aumento tolerancia al ruido.

Aunque inicialmente LoRaWAN se usó principalmente para telemetría y otras aplicaciones centradas en la carga, los casos de uso y los requisitos centrados en el tráfico de bajada están aumentando, ya que esta tecnología se está volviendo popular también para la automatización o para interfaces de usuario alternativas (como dispositivos wearables, por ejemplo) para esos escenarios industriales. Esto significa que en lugar de centrarse en los dispositivos finales que envían datos a la red a través de una puerta de enlace (GW), el flujo se invierte y los dispositivos finales dispersos en la planta son los que reciben las órdenes, instrucciones y actualizaciones de las plataformas de monitorización.

Esto presenta un tema crítico de investigación, ya que la cantidad de puertas de enlace es menor que la de los dispositivos finales, lo que significa dividir el tiempo aire y los recursos del espectro entre todos los dispositivos finales (uno a muchos), sin olvidar también dedicar recursos escuchar lo que los dispositivos finales tengan que transmitir. Así, el objetivo de esta tesis es diseñar mecanismos y soluciones que optimicen el flujo de tráfico descendente en redes LoRaWAN, en dos ámbitos: a nivel de físico en la selección de configuración de parámetros de transmisión inalámbrica propios del protocolo, en forma de un Data Rate Adaptativo; y en la planificación temporal de acceso al medio, mediante un mecanismo que basándose en la Clase B del protocolo aporte flexibilidad para adaptarse a diversos tamaños de red en función de los requisitos de diferentes posibles aplicaciones.

Resum

Les Tecnologies de la Informació i la Comunicació (TIC), en particular les solucions relacionades amb l'IoT (Internet de les coses), tenen un paper fonamental per augmentar l'eficiència, reduir l'impacte ambiental i simplificar i automatitzar les tasques. Les tecnologies IoT es poden utilitzar a tots els dominis i casos d'ús. La innovació en el domini d'IoT avança ràpidament, per la qual cosa acomodar una quantitat cada vegada més gran de dispositius que requereixen connexió a una xarxa és un tema fonamental a abordar. Aquesta expansió de la xarxa no ha de tenir el cost de la QoS (qualitat de servei) o el lliurament de missatges, especialment quan es tracta de casos crítics dús industrial.

L'enorme quantitat de trànsit de xarxa derivat d'aquestes aplicacions implica desafiaments, ja que els dispositius lluiten per un lloc a l'espectre de ràdio. Una solució orientada a la immunitat a les interferències és crucial per superar els problemes d'escalabilitat d'IoT per a una operació de xarxa fiable en un espectre saturat. Amb la tecnologia de ràdio sub-GHz, les xarxes IoT es poden segregar d'altres sistemes heretats de 2,4 GHz per mitigar els problemes de fluctuació i congestió, alhora que es beneficien d'altres característiques de LPWAN (xarxes d'àrea àmplia de baixa potència) com el rang de llarga distància, el baix consum denergia i laugment tolerància al soroll.

Encara que inicialment LoRaWAN es va fer servir principalment per a telemetria i altres aplicacions centrades en la càrrega, els casos d'ús i els requisits centrats en el trànsit de baixada estan augmentant, ja que aquesta tecnologia s'està tornant popular també per a l'automatització o per a interfícies d'usuari alternatives (com a dispositius wearables, per exemple) per a aquests escenaris industrials. Això vol dir que en lloc de centrar-se en els dispositius finals que envien dades a la xarxa a través d'una porta d'enllaç (GW), el flux s'inverteix i els dispositius finals dispersos a la planta són els que reben les ordres, instruccions i actualitzacions de les plataformes de monitorització.

Això presenta un tema crític de recerca, ja que la quantitat de portes denllaç és menor que la dels dispositius finals, la qual cosa significa dividir el temps aire i els recursos de lespectre entre tots els dispositius finals (un a molts), sense oblidar també dedicar recursos escoltar allò que els dispositius finals hagin de transmetre. Així, l'objectiu d'aquesta tesi és dissenyar mecanismes i solucions que optimitzin el flux de trànsit descendent a xarxes LoRaWAN, en dos àmbits: a nivell físic en la selecció de configuració de paràmetres de transmissió sense fil propis del protocol, en forma d'un Data Rate Adaptatiu; i en la planificació temporal d'accés al medi, mitjançant un mecanisme que basant-se en la Classe B del protocol aporti flexibilitat per adaptar-se a diverses mides de xarxa segons els requisits de diferents possibles aplicacions.

Abstract

Information and Communication Technologies (ICT), particularly solutions related to the IoT (Internet of Things), are playing a fundamental role in increasing efficiency, reducing environmental impact and simplifying and automating tasks. Innovation in the IoT domain is advancing rapidly, so accommodating an increasing number of devices that require connection to a network is a critical issue to address. Such network expansion should not come at the cost of QoS (quality of service) or message delivery, especially when it comes to critical industrial use cases.

An interference immunity oriented solution is crucial to overcome IoT scalability issues for reliable network operation in crowded spectrum. With sub-GHz radio technology, IoT networks can be segregated from other legacy 2.4 GHz systems to mitigate jitter and congestion issues, while also taking advantage of other LPWAN (Low Power Wide Area Network) features such as long-distance range, low power consumption, and increased noise tolerance.

Although LoRaWAN was initially used primarily for telemetry and other load-centric applications, downstream-centric use cases and requirements are increasing as this technology is becoming popular for automation or alternative user interfaces as well. (like wearable devices, for example) for those industrial scenarios. This means that instead of focusing on the end devices that send data to the network through a gateway (GW), the flow is reversed and end devices scattered throughout the plant are the ones that receive the orders, instructions and updates. of the monitoring platforms.

This presents a critical research topic, as the number of gateways is less than the number of end devices, which means dividing airtime and spectrum resources among all end devices (one-to-many), not forgetting also dedicate resources to listen to what the end devices have to transmit. Thus, the objective of this thesis is to design mechanisms and solutions that optimize the flow of downward traffic in LoRaWAN networks, in two areas: at the physical level in the selection of configuration of wireless transmission parameters of the protocol, in the form of a Data Adaptive Rate; and in the temporary planning of access to the medium, by means of a mechanism that, based on the Class B of the protocol, provides flexibility to adapt to different sizes of networks depending on the requirements of different possible applications.

Índice general

Agradecimientos **iii**

Resumen **v**

Resum **vii**

Abstract **ix**

Índice general **xi**

Acrónimos **xiii**

1 Introducción **1**
1.1 Antecedentes y motivaciones 1
1.2 Objetivos de la tesis 4
1.3 Publicaciones 5
1.3.1 Artículos en revistas científicas 5
1.4 Aportaciones de la tesis 6
1.5 Organización de la memoria 7

2 Estado del arte de redes LPWAN **9**
2.1 Tecnologías de comunicaciones LPWAN 9
2.1.1 Redes LPWAN con infraestructura pública o celular 10
2.1.2 Redes LPWAN privadas 12
2.2 Tecnología de comunicaciones seleccionada: LoRaWAN 17
2.2.1 Tipos de comunicación, clases y dispositivos 22
2.2.2 Comisionamiento de nodos 26
2.2.3 Comandos de control y tipos de paquetes 27

3 Simulación de redes para LoRaWAN con modelo de ruido **33**
3.1 Simuladores de red 33
3.1.1 Simulación de redes LoRaWAN con ns-3 37
3.2 Fuentes de ruido e interferencias para el simulador 38

4 Configuración adaptativa según calidad del enlace **49**
4.1 Introducción 49
4.2 Calidad de enlace en LoRaWAN: Tasa de Datos Adaptativa 51
4.2.1 Escenario de pruebas 56
4.2.2 Resultados de ADR para downlink basado en estándar 60

4.3 Mecanismo DROB: Data Rate Optimization for class B 65
4.3.1 Resultados para DROB 69
4.4 Conclusiones 76

5 Optimización de planificaciones para LoRaWAN Clase B 77
5.1 Introducción 77
5.2 Planificación del acceso al medio en clase B 80
5.3 Modelo analítico para cola de gateway en clase B 81
5.4 Diseño y evaluación del mecanismo de tamaño de slot dinámico 85
5.4.1 Simulaciones ABCP 91
5.4.2 Análisis de resultados de ABPC y validación del modelo analítico 92
5.5 Conclusiones 96

6 Polling para sistemas de adquisición de datos 99
6.1 Introducción 99
6.2 Diseño y resultados del planificador en clase B 102
6.3 Diseño y resultados del planificador en clase C 107
6.4 Análisis del Consumo Energético y Duración de la Batería en fases de Polling 110
6.5 Análisis del Impacto de los Mecanismos de Polling en la Seguridad de las Redes LoRaWAN . . 111
6.6 Conclusiones 112

7 Conclusiones y trabajos futuros 115
7.1 Resumen de las contribuciones principales 115
7.2 Análisis de resultados y validación Cuantitativa 116
7.3 Impacto técnico y económico para la Industria 118
7.4 Propuesta de arquitectura y líneas de trabajo futuro 118
7.5 Conclusión Final 120

Bibliografía 125

A Herramientas de planificación para despliegues en industria 127
A.1 Introducción 127
A.2 LoRaWAN Indoor Mapper: LIMA 128
A.3 El Planificador PSILO: Orquestación Inteligente de la Red LoRaWAN 130
A.4 Metodología de Despliegue Asistido por Herramientas 132

B LoRaWAN para aplicaciones de Smart Farm, entorno rural y montaña 135
B.1 Introducción 135
B.2 Caracterización de aplicaciones para LoRaWAN en Smart Farming 135
B.3 Uso de Gateways móviles para garantizar cobertura 138

Acrónimos

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

6LoWPAN: IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network

ABPC: Adaptive Beacon Period Configurator

ACK: Acknowledgement

ADR: Adaptive Data Rate

AS: Application Server

AWGN : Additive White Gaussian Noise

CCA: Clear Channel Assesment

CSMA-CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CSS: Chirp Spread Spectrum

DR: Data Rate

DROB: Data Rate Optimization for class B

DTN: Delay Tolerant Networks

DTS: Direct to Satellite

EB: Enhanced Beacon

EMI : Electromagnetic Interference

ETX: Expected Transmission Count

EWMA: Exponentially Weighted Moving Average

FFD: Full Function Device

GPRS: General Packet Radio Service

GTS: Guaranteed Time Slots

GW: Gateway

HART: Highway Addressable Remote Transducer

HMI: Human Machine Interface

HMS: Hardware Meets Software

ICMPv6: Internet Control Message Protocol version 6

ICT: Information and Communication Technologies

IdC: Internet de las Cosas

IEC: International Electrotechnical Commission

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IETF: Internet Engineering Task Force

IIoT: Industrial Internet of Things

IoT: Internet of Things

IP : Internet Protocol

JCR: Journal Citation Reports

LE: Low Energy

LLDN: Low Latency Deterministic Networks

LLN: Low-Power and Lossy Networks

LPM: Low Power Mode

LPWAN: Low Power Wide Area Networks

LR-WPAN: Low Rate Wireless Personal Area Networks

LTE: Long Term Evolution

M2M: Machine to Machine

MAC: Medium Access Control

MIMO: Multiple Input Multiple Output

mMTC: massive Machine Type Communications

MOP: Mode Of Operation

MPDU: MAC Protocol Data Unit

MU-MIMO: Multiple User MIMO

NB-IoT: NarrowBand - Internet of Things

NS: Network Server

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

OQPSK: Offset Quadrature Phase-Shift Keying

OTAA: Over-The-Air-Activation

P2P: Peer to Peer

PCF: Point Coordination Function

PDR: Packet Delivery Ratio

PHY: Physical

PLR: Packet Loss Ratio

PRR: Packet Reception Rate

PSILO: Polling System LoRaWAN

PSM: Power Saving Mode

QoS: Quality of Service

RAN: Radio Access Network

RF : Radiofrecuencia

RFD: Reduced-Function Device

RFID: Radio Frequency Identification

RSSI: Received Signal Strength Indicator

RTT: Round Trip Time

Rx: Receive

SF: Spreading Factor

Sigfox:

SNR: Signal-to-Noise Ratio

TCP: Transmission Control Protocol

TOA: Time on Air

TSN: Time-Sensitive Networking

Tx: Transmit

UDP: User Datagram Protocol

URLLC: Ultra Reliable Low Latency Communications

UWB: Ultra Wide Band

VoIP: Voz sobre IP

WLAN: Wireless Local Area Network

WPAN: Wireless Personal Area Network

WSN: Wireless Sensor Network

WWAN: Wireless Wide Area Networks

Índice de figuras

1.1 Cuota de mercado de tecnologías de red en industria según informe de HMS networks para 2023 [1] . . . 2
1.2 Crecimiento del mercado de LPWAN según informe de la consultora Zion Market Research para el periodo de 2023-2032 [2] . . . 2

2.1 Clasificación redes inalámbricas . . . 9
2.2 Arquitectura de NB-IoT, [5] . . . 12
2.3 Arquitectura de red Sigfox (Sigfox Technical Overview - May 2017)[6] . . . 14
2.4 Modulación LoRa . . . 18
2.5 Estructura de red LoRaWAN. Adaptado de [10] . . . 20
2.6 Comportamiento de la modulación LoRa según SF . . . 21
2.7 Clases A, B y C definidas en el estándar. Adaptado de [10] . . . 25
2.8 Parámetros temporales definidos por el modo de acceso al medio Clase B . . . 25
2.9 Formato de trama . . . 28

3.1 Bloques del sistema que caracteriza el ruido sobre la señal . . . 42
3.2 Señal interferente durante 1 hora . . . 42
3.3 Ruido durante un minuto en periodo de alta interferencia . . . 43
3.4 Escenario simulado con fuentes de interferencia . . . 44
3.5 Resultados con la simulación de nodos interferentes . . . 46

4.1 Selección de SF: (a) Posible Decremento de SF (b) Incremento de SF . . . 53
4.2 Mecanismo de ADR recomendado por el estándar, ejecutado en el NS (aumento de DR) o en el dispositivo (descenso de DR) . . . 54
4.3 Mecanismo de ADR ajustado para tráfico descendente, ejecutado en el NS, informando a los dispositivos. . . . 55
4.4 Cambios de SF en el tiempo según el valor de C_x . . . 59
4.5 Mapa de calor SF para uplink (clase A) . . . 60
4.6 Mapa de calor SF para downlink (clase B) . . . 61
4.7 PDR . . . 62
4.8 Energía consumida por nodo tras 24h según el SF utilizado en fase uplink . . . 63
4.9 Energía total consumida en 24h por la red en fase uplink . . . 63
4.10 Energía consumida por nodo tras 24h según el SF utilizado en fase downlink . . . 64
4.11 Energía total consumida en 24h por la red en fase downlink . . . 64
4.12 Ventana Deslizante sin solape . . . 65
4.13 Algoritmo del mecanismo DROB . . . 67
4.14 Pseudocódigo del mecanismo DROB . . . 68

4.15 Paquetes destruidos por interferencias en 24h . . . 69
4.16 PDR en cada dispositivo de la red durante 24h de simulación . . . 71
4.17 PDR en cada dispositivo de la red en detalle de un periodo de 1h con altos niveles de ruido . 71
4.18 Comparación de PDR medio para cada almacén del escenario con o sin DROB activado en 24h 72
4.19 Comparación de PDR medio para cada almacén del escenario con o sin DROB activado durante 1h de interferencias . . . 72
4.20 Cantidad de cambios de DR para downlink en cada dispositivo en 24h . . . 73
4.21 Cantidad de cambios de DR para downlink en cada dispositivo para 1h de interferencias . . . 73
4.22 Eventos registrados en la cola del GW, afectados por el funcionamiento de clase B y por el DR usado . . . 74
4.23 Energía total consumida durante downlink con DROB o DR fijo . . . 75

5.1 Eventos posibles durante la transmisión en un gateway . . . 81
5.2 Diagrama del sistema modelado . . . 82
5.3 Selección de la duración de un pingslot en función de k . . . 86
5.4 Diagrama de flujo de ABPC . . . 89
5.5 Pseudoalgoritmo ABPC . . . 90
5.6 Impacto de los diferentes eventos en la cola del gateway según el tamaño de la red y del tamaño de la ventana planificada . . . 93
5.7 PDR y delay medio según tamaño de red y Beacon Period . . . 94
5.8 Consumo en la red según Beacon Period y número de nodos . . . 95
5.9 Tiempo de vida de la red según consumo energético . . . 96

6.1 Polling en Clase B unicast . . . 104
6.2 Polling en Clase B con soporte multicast . . . 105
6.3 Latencia máxima para polling unicast y multicast (ocho canales) de Clase B en función del tamaño de la red . . . 106
6.4 Impacto del número de canales en el retardo de polling para una red multicast de 100 nodos en Clase B . . . 106
6.5 Eventos posibles durante la operativa en Clase C en el GW . . . 107
6.6 Polling en Clase C unicast . . . 107
6.7 Polling en Clase C con soporte multicast . . . 108
6.8 Período en segundos para polling unicast y multicast (ocho canales) de Clase C, en función del tamaño de la red . . . 109
6.9 Impacto del número de canales en el retardo de polling para una red multicast de 100 nodos en Clase C . . . 109
6.10 Duración de la batería en años para polling unicast y multicast (ocho canales) de Clase B, en función del tamaño de la red y el SF . . . 110

7.1 Diagrama de red con planificador y varios Gateways . . . 119
7.2 Diagrama de bloques del planificador de red . . . 119

A.1 Captura de herramienta web para planificación de despliegues indoor . . . 128
A.2 Mapa de calor representando el RSSI generado por la herramienta . . . 129
A.3 Mapa de calor representando la redundancia de gateways al alcance . . . 130
A.4 Captura de la herramienta web de gestión de Polling . . . 131
A.5 Captura de la herramienta web para gestión multicast . . . 132
A.6 Espectrograma con el análisis centrado en la banda de 868 MHz . . . 133

B.1 Vista satélite del escenario monitorizado . . . 138
B.2 Diagrama de la solución propuesta en áreas remotas sin cobertura . . . 139
B.3 Vista satélite del área recorrida por el GW móvil y la ubicación de los dispositivos . . . 139

Índice de tablas

2.1 Comparación de tecnologías LPWAN celulares 10
2.2 Comparación de tecnologías LPWAN privadas 13
2.3 Parámetros Regionales de LoRaWAN para Europa (EU868) 22
2.4 Tabla Comparativa Avanzada de Clases LoRaWAN 24
2.5 Comandos MAC disponibles en el estándar 30

3.1 Ventajas y Desventajas de los Simuladores de Red 34
3.2 Comparación de Simuladores de Red 35
3.3 Tipología de fuentes de interferencia en industria 40
3.4 Parámetros de Configuración de la Simulación LoRaWAN en Entorno Industrial 45

4.1 Requisitos de SNR para recepción en LoRa 52
4.2 Parámetros de Simulación 58
4.3 Estadísticas de PDR con ADR o con SF fijo 60
4.4 Tiempo hasta SF optimo en función de las muestras y periodo de mensajes 61
4.5 Resultados de PDR globales de la red para DROB con distintos C_x 70
4.6 Resultados de PDR globales de la red para configuraciones DROB y DR fijo 73

5.1 Parámetros del modelo 83
5.2 Duración del pingslot según la duración del Beacon Period 87
5.3 Consideraciones de diseño basadas en el tamaño de paquete, duty cycle y beacon period . . . 88
5.4 Configuración del escenario simulado 91
5.5 Parámetros de energía y consumo 92

6.1 Duración de la guarda de baliza calculada para diferentes configuraciones 105

7.1 Análisis cuantitativo del rendimiento de los mecanismos propuestos en escenarios clave. 117

B.1 Recomendaciones de la aplicación de LoRaWAN en entornos rurales, Parte I 136
B.2 Recomendaciones de la aplicación de LoRaWAN en entornos rurales, Parte II (Continuación) . 137
B.3 Recomendaciones de la aplicación de LoRaWAN en entornos rurales, Parte III 137
B.4 Métricas de enlace obtenidas para la pasarela fija y móvil 140

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes y motivaciones

La digitalización de la industria, también conocida como Industria 4.0, ha generado una necesidad imperiosa de conectar una gran cantidad de dispositivos y sensores en entornos industriales. Estos dispositivos, desde máquinas herramienta hasta sensores de temperatura y humedad, generan grandes volúmenes de datos que pueden ser utilizados para optimizar los procesos productivos, mejorar la toma de decisiones y desarrollar nuevos modelos de negocio.

Tradicionalmente, las comunicaciones industriales se han basado en tecnologías como Ethernet, buses de campo y protocolos propietarios. Sin embargo, estas tecnologías presentan limitaciones en términos de costo, complejidad de implementación y escalabilidad, lo que las hace poco adecuadas para conectar un gran número de dispositivos en entornos distribuidos y heterogéneos.

La creciente demanda por mejorar la eficiencia, la productividad y la competitividad en los procesos industriales ha impulsado la búsqueda de soluciones tecnológicas innovadoras. En este contexto, el Internet de las Cosas (IoT) ha emergido como una de las tendencias más disruptivas de los últimos años, prometiendo transformar la forma en que las empresas operan.

Las redes inalámbricas desempeñan un papel fundamental en la digitalización y la implantación de IoT en la industria (conocido como IIoT). Estas redes permiten conectar dispositivos remotos, lo que es esencial para aplicaciones como la monitorización de máquinas y procesos, el control remoto de instalaciones o la gestión de la cadena de suministro, y sin ellas sería imposible conectar y comunicar la gran cantidad de dispositivos que conforman un ecosistema IIoT.

El estudio de 2023 realizado por HMS Networks incluye cuotas de mercado estimadas y tasas de crecimiento para buses de campo, Ethernet industrial y tecnologías inalámbricas, y muestra cómo las predicciones son que el crecimiento inalámbrico se acelerará al +22% en 2023, a medida que se introduzcan más soluciones de redes industriales inalámbricas en la automatización de fábricas (figura 1.1). En este contexto, las redes de área amplia de baja potencia (Low Power Wide Area Network o LPWAN, por sus siglas en inglés) han emergido

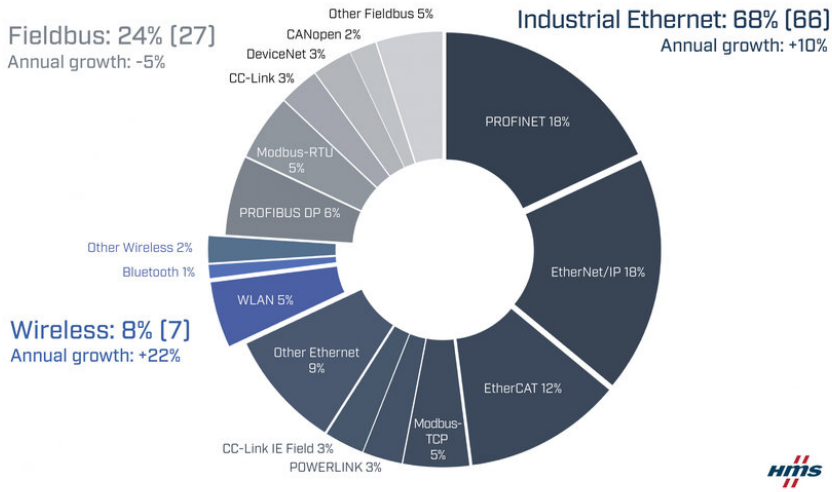


Figura 1.1: Cuota de mercado de tecnologías de red en industria según informe de HMS networks para 2023 [1]

como una tecnología disruptiva, permitiendo la conexión de una gran cantidad de dispositivos de bajo consumo energético en áreas geográficas extensas. Su capacidad para operar en entornos industriales, caracterizados por condiciones adversas y requisitos específicos, las ha posicionado como una pieza clave en la digitalización de los procesos productivos. Estas características las hacen ideales para aplicaciones industriales, donde se requiere la monitorización de dispositivos remotos de forma eficiente y económica.

El mercado de las LPWAN está experimentando un crecimiento exponencial (figura 1.2), impulsado por la creciente demanda de soluciones IoT en diversos sectores industriales, como la manufactura, la logística, la agricultura y la energía. Se espera que este crecimiento continúe en los próximos años, a medida que las empresas adopten cada vez más tecnologías IoT para mejorar sus operaciones, diversificar las aplicaciones y reducir los costes de implementación.

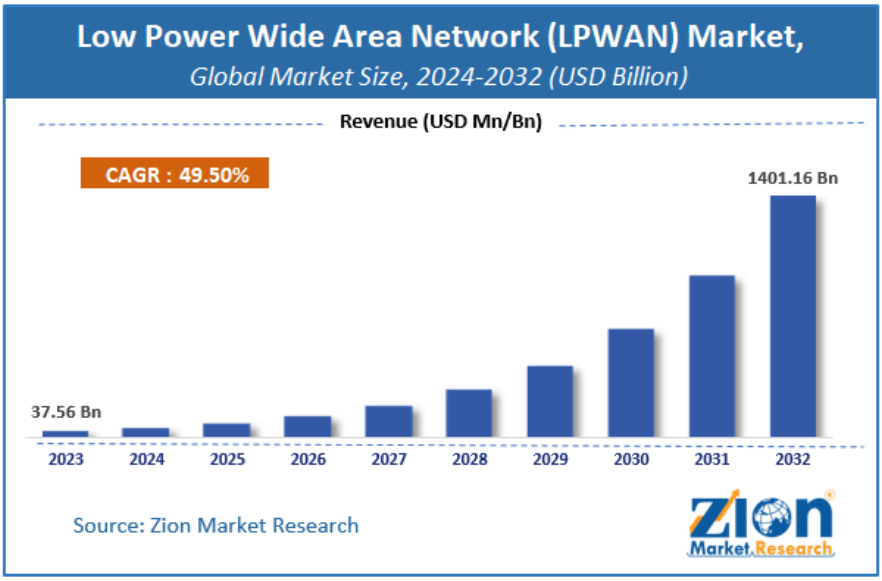


Figura 1.2: Crecimiento del mercado de LPWAN según informe de la consultora Zion Market Research para el periodo de 2023-2032 [2]

Las LPWAN ofrecen una serie de ventajas frente a otras tecnologías inalámbricas, como las redes Wi-Fi o las redes celulares, que las hacen especialmente atractivas para la industria:

- Reducción de costes: Los dispositivos LPWAN y la infraestructura de red suelen ser más económicos que otras tecnologías de comunicación inalámbrica.
- Amplio alcance: Estas redes permiten conectar dispositivos ubicados a grandes distancias, lo que es fundamental en entornos industriales distribuidos.
- Alta penetración: Las señales LPWAN pueden atravesar paredes y otros obstáculos físicos, lo que garantiza una cobertura robusta en entornos industriales complejos.
- Seguridad: Las redes LPWAN ofrecen un alto nivel de seguridad, lo que es importante para aplicaciones industriales sensibles.
- Bajo consumo energético: Los dispositivos LPWAN pueden operar durante largos períodos de tiempo con baterías de pequeña capacidad, lo que reduce los costos de mantenimiento y facilita su despliegue en ubicaciones remotas.

Sin embargo, a pesar de sus numerosas ventajas, las redes LPWAN también presentan desafíos que deben ser abordados para garantizar su correcto funcionamiento en entornos industriales. Entre los principales desafíos se encuentran:

- Interferencias: La presencia de múltiples dispositivos inalámbricos en un entorno industrial puede generar interferencias que degradan el rendimiento de la red.
- Confiabilidad: La necesidad de garantizar una alta confiabilidad en la transmisión de datos es fundamental para muchas aplicaciones industriales.
- Escalabilidad: Las redes LPWAN deben ser capaces de escalar para soportar un gran número de dispositivos y un alto volumen de tráfico.

El rendimiento de las redes LPWAN se puede ver afectado por una serie de factores, como la densidad de dispositivos, la topología de la red o la interferencia con otras señales. La optimización del rendimiento de las redes LPWAN es esencial para garantizar que estas puedan satisfacer las necesidades de las aplicaciones industriales. Para hacer frente a estos desafíos y maximizar el potencial de las LPWAN en la industria, es necesario desarrollar mecanismos de optimización que permitan mejorar el rendimiento, la eficiencia y la fiabilidad de estas redes. Estos mecanismos pueden actuar a diferentes niveles, desde la capa física hasta la capa de aplicación, y pueden incluir técnicas como:

- Optimización del espectro radioeléctrico: Selección de configuraciones radio óptimas, adaptación de la potencia de transmisión y técnicas de evasión de interferencias.
- Gestión de la energía: Desarrollo de algoritmos de gestión de energía que permitan prolongar la vida útil de las baterías de los dispositivos.
- Políticas de acceso al medio: Establecer planificaciones de acceso al medio que permitan un funcionamiento determinista y libre de colisiones.
- Calidad de servicio: Implementación de mecanismos de calidad de servicio para garantizar la entrega de datos en tiempo real y con una alta fiabilidad.

La motivación principal de este trabajo es contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas que permitan aprovechar al máximo el potencial de las redes LPWAN en la industria.

Al mejorar el rendimiento y la eficiencia de estas redes, se pueden habilitar nuevas aplicaciones y servicios que generen un mayor valor para los usuarios de la tecnología. Esta tesis se centra en el desarrollo de mecanismos de optimización para el uso de redes LPWAN en industria. con el objetivo de mejorar el rendimiento de las redes LPWAN en términos de eficiencia energética, cobertura y capacidad en aplicaciones hasta ahora restringidas por las limitaciones de la tecnología.

Los mecanismos de optimización que se desarrollarán en esta tesis se basan en técnicas de adaptación dinámica y automática y planificación del acceso al medio. El uso de estos mecanismos de optimización para redes LPWAN presenta una serie de ventajas, como:

- Adaptabilidad: Los mecanismos de optimización pueden adaptarse a las condiciones cambiantes de la red.
- Eficiencia: La planificación de red reduce las posibles colisiones, aumenta la confiabilidad y puede reducir el consumo energético.

La investigación que se presenta en esta tesis tiene el potencial de contribuir al desarrollo de redes LPWAN más eficientes y seguras para aplicaciones industriales.

1.2 Objetivos de la tesis

A continuación, se detallan los objetivos principales de la tesis, comenzando por el estudio y selección de tecnologías, hasta la propuesta de diseño y mecanismos que permiten optimizar el funcionamiento de este tipo de redes inalámbricas de largo alcance y bajo consumo.

- Estudio y evaluación de tecnologías de comunicaciones LPWAN candidatas, que permitan cumplir con los requisitos de las redes de sensores inalámbricas en ámbito industrial. Se analizarán los mecanismos de acceso MAC más adecuados para industria, y analizar los desafíos y oportunidades de las LPWAN en la industria. Será necesario seleccionar una plataforma de desarrollo y simulación en la que poder definir los experimentos y pruebas.
- Caracterizar el comportamiento de una red LoRaWAN, especialmente en clase B, es ideal para aplicaciones que requieren una comunicación bidireccional con cierta regularidad, abriendo ventanas de recepción programadas, como el control remoto de actuadores o la recepción de comandos.
- Proponer y evaluar diferentes mecanismos de optimización para mejorar el rendimiento de las LPWAN:
  - Diseñar e implementar un mecanismo que permita gestionar la configuración de parámetros radio en las transmisiones del gateway.
  - Diseñar e implementar un mecanismo de planificación dinámico para las ventanas de transmisión de gateways en clase B.
  - Diseñar e implementar mecanismos de planificación de polling que habiliten una adquisición de datos controlada y escalable con trafico bidireccional.

1.3 Publicaciones

A continuación se muestra un listado de las principales publicaciones realizadas en el marco de estudio de la presente tesis, incluyendo tanto artículos de divulgación científica, como participación en proyectos de investigación de financiación nacional y europea.

1.3.1 Artículos en revistas científicas

Clave: Revista indexada JCR		**Factor Impacto:** 2.7
Título: Analysis of Bidirectional ADR-Enabled Class B LoRaWAN Networks in Industrial Scenarios		
Autores: David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá,Ana Planes-Martinez		
Revista: Applied Sciences		
Editorial: MDPI		
Volumen: 10	**Número:** 17	**Año:** 2020
DOI: https://doi.org/10.3390/app10227964		

Clave: Revista indexada JCR		**Factor Impacto:** 2.690
Título: Robust downlink mechanism for Industrial Internet of Things using LoRaWAN networks		
Autores: David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá		
Revista: Electronics		
Editorial: MDPI		
Volumen: 10	**Número:** 17	**Año:** 2021
DOI: https://doi.org/10.3390/electronics10172122		

Clave: Revista indexada JCR		**Factor Impacto:** 2.4
Título: LoRaWAN networks for smart applications in rural settings		
Autores: Luis Miguel Bartolin-Arnau, David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá,Salvador Santonja-Climent		
Revista: IETE Technical Review		
Editorial: Taylor & Francis Group		
Volumen: 40	**Número:** 3	**Año:** 2022
DOI: https://dx.doi.org/10.1080/02564602.2022.2121773		

Clave: Revista indexada JCR		**Factor Impacto:** 1.1
Título: Hybrid solution for smart rural applications in areas without Internet coverage		
Autores: Luis Miguel Bartolin-Arnau, David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá, Salvador Santonja-Climent		
Revista: International Journal of Sensor Networks		
Editora: InderScience Publishers		
Volumen: 40	**Número:** 4	**Año:** 2022
DOI: https://doi.org/10.1504/IJSNET.2022.10050654		

Clave: Revista indexada JCR		**Factor Impacto:** 3.476
Título: Adaptive Beacon Period Configurator for scalable LoRaWAN downlink applications		
Autores: David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá, Salvador Santonja-Climent		
Revista: IEEE Access		
Editora: IEEE		
Volumen: 11		**Año:** 2023
DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3301991		

Clave: Revista indexada JCR		**Factor Impacto:** 3.4
Título: Polling Mechanisms for Industrial IoT Applications in Long-Range Wide-Area Networks		
Autores: David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Miguel Sempere-Payá, Salvador Santonja-Climent		
Revista: Future Internet		
Editora: MDPI		
Volumen: 16	**Número:** 4	**Año:** 2024
DOI: https://doi.org/10.3390/fi16040130		

1.4 Aportaciones de la tesis

Las aportaciones de la tesis se han dividido en tres aspectos bien diferenciados, centrados en diferentes propuestas de mejora del estándar LPWAN seleccionado. De manera complementaria, se han desarrollado también herramientas y mecanismos de soporte al despliegue en escenarios industriales de distintos tipos, para poder ayudar con la validación, y agilizar la adopción de las tecnologías propuestas.

El primer aspecto se centra en optimizar los parámetros de configuración radio para mejorar la robustez y alcance del tráfico descendente.

El segundo aspecto está centrado en optimizar el acceso al medio de los gateways considerando las posibilidades de las clases LoRaWAN, mediante planificación del tráfico de acuerdo a los requisitos dinámicos de la red.

El tercero, combinar la planificación de tráfico descendente y ascendente, basándose en las aportaciones anteriores, para habilitar sistemas de polling para adquisición de datos en aplicaciones de escenarios industriales.

A continuación, se detallan las principales aportaciones de esta tesis.

- Caracterización del uso de métricas ADR en redes LoRaWAN
- Desarrollo de una función de ADR para el tráfico descendente
- Caracterización de eventos en gateways con nodos clase B
- Desarrollo de un modelo analítico de las colas de GW para clase B
- Uso de métricas energéticas para optimizar el acceso a la red y extender su vida útil
- Desarrollo de un mecanismo de optimización de planificación para clase B y clase C en diferentes aplicaciones o tamaños de red
- Desarrollo de una herramienta de planificación de despliegue y configuración para redes LoRaWAN en interiores

1.5 Organización de la memoria

La memoria de la tesis ha sido estructurada teniendo en cuenta los diferentes desarrollos realizados con el objetivo de optimizar y mejorar diferentes aspectos de funcionamiento de redes LoRaWAN en entornos industriales. A continuación, se detallan los contenidos de los diferentes capítulos que componen esta memoria.

- En el Capítulo 2 se realiza un análisis de diferentes tecnologías de comunicaciones inalámbricas con énfasis en las redes de largo alcance. En este resumen se muestran las principales características de cada una, valorando sus posibles aplicaciones en escenarios industriales. Tras este resumen, se profundiza en el estándar LoRaWAN.
- En el Capítulo 3 se introducen los simuladores de redes, necesarios para poder validar las propuestas de mejora de los diferentes mecanismos en un entorno controlado que permita un gran escalabilidad, difícilmente posible con un despliegue real en un laboratorio. Además de seleccionar un simulador adecuado para este tipo de redes, se describen y validan nuevos módulos integrados que permiten caracterizar con mayor fidelidad un escenario industrial, añadiendo fuentes de ruido e interferencia realistas.
- El Capítulo 4 se centra en el estudio de diferentes mecanismos de Adaptive Data Rate (ADR) y su aplicación bidireccional, centrándose en optimizar el flujo de trafico

descendente. *Para caracterizar adecuadamente el escenario industrial, se incluye el desarrollo de fuentes de ruido para el simulador.*

- En el Capítulo 5 se detallan los procesos de operación de la clase B en LoRaWAN para ofrecer una comportamiento determinista y robusto para tráfico descendente. Se caracterizan los eventos posibles en las colas de los gateways, y se define un modelo analítico para caracterizar la respuesta de esas colas en función del tamaño de red. Identificando que parámetros contribuyen a optimizar este proceso de planificación, se propone un mecanismo dinámico que modifica el tamaño de la ventana de transmisión, consiguiendo optimizar el funcionamiento de la red de acuerdo a su tamaño y a posibles requisitos de aplicación variables definidos por el administrador de la red.

- En el Capítulo 6 se estudia el uso del tráfico descendente para implementar sistemas de adquisición de datos basados en el paradigma de polling, habitual en industria. Para ello es necesario considerar las restricciones del protocolo LoRaWAN, las posibilidades de las distintas clases de acceso al medio y funcionamiento multicanal.

- En el Apéndice A se propone el uso de una herramienta de usuario que facilite el despliegue de estas redes, cubriendo diferentes aspectos como la cobertura y calidad de señal en interiores, planificador de ubicación de gateways o un planificador de polling y multicast.

- En el Capítulo 7 se detallan unas conclusiones finales a todo el proceso de investigación llevado a cabo durante la tesis, *y se incluye una propuesta de tecnología de optimización unificada.* Además, se muestran algunas líneas de posibles trabajos futuros y tecnologías que marcarán un nuevo hito en las comunicaciones en industria.

Capítulo 2

Estado del arte de redes LPWAN

2.1 Tecnologías de comunicaciones LPWAN

Las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN, por sus siglas en inglés) han revolucionado la forma en que conectamos dispositivos de bajo consumo en grandes áreas geográficas. Estas tecnologías han abierto las puertas a una infinidad de aplicaciones en el Internet de las Cosas (IoT), permitiendo la monitorización y control remoto de sensores y actuadores en entornos urbanos, industriales y rurales.

El surgimiento de diversas tecnologías LPWAN, como LoRaWAN, NB-IoT o Sigfox, entre otras, ha generado un panorama competitivo y en constante evolución. Cada una de estas tecnologías presenta características únicas en términos de alcance, tasa de datos, latencia, coste y complejidad de implementación, lo que las hace más adecuadas para diferentes tipos de aplicaciones, y su comparación se puede encontrar como el objeto de estudio de múltiples trabajos ([3]).

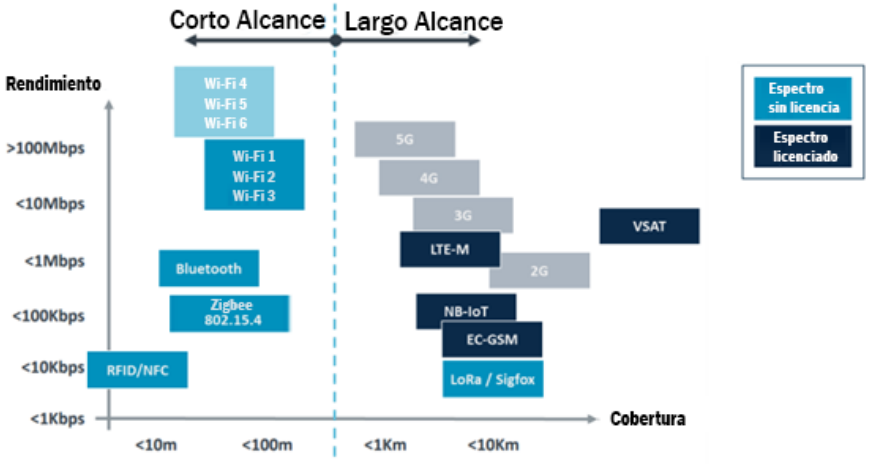


Figura 2.1: Clasificación redes inalámbricas

Para proporcionar una referencia completa en esta fase de selección, este capítulo analiza el estado del arte de las tecnologías LPWAN.

Se analizan a fondo las características, pros y contras de las principales alternativas disponibles, ofreciendo un análisis comparativo que permite comprender las peculiaridades de cada una y cuál es la mejor solución para su caso.

Así, este análisis constituye la base para una elección informada de la tecnología base sobre la cual se sustentan los desarrollos y la investigación posteriores discutidos a lo largo de la tesis.

2.1.1 Redes LPWAN con infraestructura pública o celular

Las LPWAN celulares como NB-IoT y LTE-M tienen la ventaja de utilizar la infraestructura existente de la red móvil, pero son infraestructuras como servicio, lo que significa que un proveedor administra dichas infraestructuras.

Las Redes de Baja Potencia de Banda Estrecha se definen por una cobertura amplia, penetrabilidad robusta en edificios u otras estructuras, y bajos requisitos energéticos que se adaptan a casos de uso de IoT donde se necesitan enviar cantidades relativamente pequeñas de datos en intervalos discretos. Están integradas dentro de las redes 4G y 5G y se benefician de toda la seguridad y confiabilidad que estas redes proporcionan.

Esta tabla resume las características principales de NB-IoT y LTE-M en una tabla comparativa que permite analizar las diferencias y aplicaciones apropiadas de NB-IoT y LTE-M (ver Tabla 2.1). Tras la tabla, se amplia la descripción con más detalle.

Tabla 2.1: Comparación de tecnologías LPWAN celulares

Característica	NB-IoT	LTE-M
Tipo	Celular	Celular
Ancho de banda	180 kHz	1.4 MHz
Tasa de datos	Baja (kbps)	Media (cientos de kbps)
Latencia	Alta	Media
Movilidad	Baja	Alta
Consumo de energía	Muy bajo	Bajo
Complejidad del dispositivo	Baja	Media
Costo del módulo	Bajo	Medio
Cobertura	Depende del operador	Depende del operador
Aplicaciones	Medidores inteligentes, sensores estáticos, alarmas	Seguimiento de activos, wearables, sistemas de control

LTE-M

LTE-M (Long Term Evolution for Machines, también conocido como LTE Cat-M1) es un estándar de tecnología de radio estandarizado por el 3GPP, desarrollado específicamente para abordar las comunicaciones máquina a máquina (M2M) y para el Internet de las Cosas (IoT). Este estándar ofrece menor consumo de energía, mayor cobertura y menores costes que las tecnologías celulares anteriores.

Esta tecnología, aunque opera sobre la infraestructura de red LTE, emplea anchos de banda significativamente más estrechos (1.4 MHz) y las clases de modulación utilizadas son QPSK y 16QAM. El estándar incluye soporte para *Single-Tone Transmission* y salto de frecuencia que mejora la cobertura y la robustez de la señal. La potencia máxima de transmisión permitida es de hasta 23 dBm, con lo que consigue alcanzar una cobertura superior en comparación con NB-IoT, maximizando la conectividad en áreas rurales o en interiores.

LTE-M, al contrario que las redes móviles de usuario habituales, se dirigen a dispositivos de baja movilidad y bajas tasas de datos. Para ello, incluye características, como el modo de ahorro de energía (PSM) y eDRX (recepción discontinua extendida). En cuanto a la seguridad de la red, LTE-M proporciona autenticación mutua, cifrado y aseguramiento de la integridad de datos.

Sin embargo, esta tecnología también presenta limitaciones, como un coste mayor que otras tecnologías LPWAN, complejidad en su implementación y disponibilidad limitada de servicio en algunas regiones.

NB-IoT

NB-IoT (Internet de las cosas de banda estrecha), estándar 13/14 y referido como tecnología LTE Cat-NB1 LPWAN ([4]), está estandarizada por el 3GPP y utiliza un subconjunto de la tecnología de acceso radio LTE del 3GPP con el propósito de ser utilizada en aplicaciones IoT que requieren bajo consumo de energía, buena penetración en edificios y menor tasa de datos.

La arquitectura para NB-IoT también se basa en LTE, como es el caso de LTE-M; sin embargo, con varios cambios. En su lugar, emplea un ancho de banda más estrecho de 180 kHz y utiliza modulaciones BPSK y QPSK para garantizar eficiencia energética y robustez. Para adaptarse a diferentes estados del canal, admite *Single-Tone Transmission* y *Multi-Tone Transmission*. La potencia máxima de transmisión es de 20 dBm, inferior a LTE-M.

Para reducir el consumo de energía, presenta PSM (Modo de Ahorro de Energía) y Recepción Discontinua extendida (eDRX).

La arquitectura que propone se compone de tres elementos principales2.2: los dispositivos NB-IoT, la red de acceso radio NB-IoT (RAN) y la red central (CN). Los dispositivos NB-IoT son dispositivos de bajo consumo y baja complejidad que se conectan a la red NB-IoT. La red NB-IoT RAN es la encargada de gestionar las comunicaciones entre los dispositivos NB-IoT y la red central. La red central es la encargada de gestionar la conectividad y los servicios de los dispositivos NB-IoT. La arquitectura de NB-IoT permite la coexistencia con las redes LTE existentes, lo que facilita su despliegue y adopción. En cuanto a seguridad, NB-IoT ofrece autenticación mutua, cifrado e integridad de los datos.

Sin embargo, presenta limitaciones como una velocidad de datos relativamente baja (250 kbps), latencia relativamente alta, movilidad limitada y alta complejidad por su coexistencia con

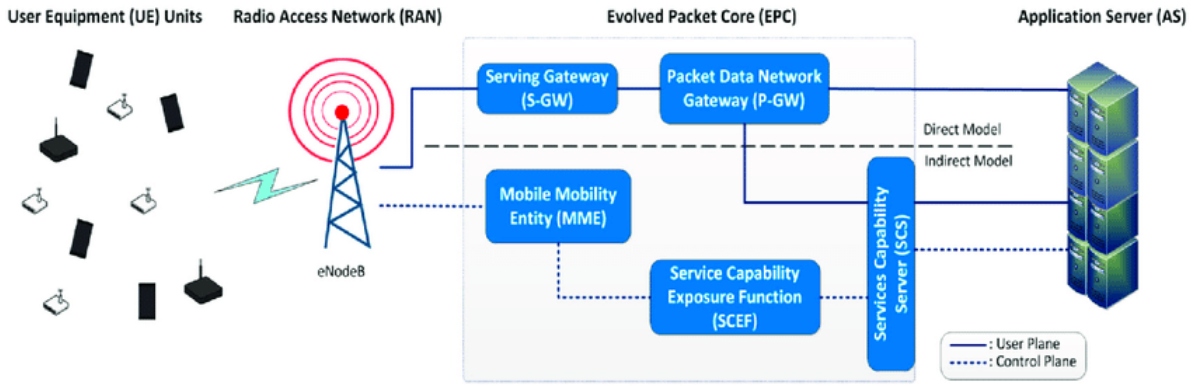


Figura 2.2: Arquitectura de NB-IoT, [5]

LTE. Además, la disponibilidad del servicio de red puede ser limitada en algunas regiones y el consumo de energía en modo activo puede ser bastante mayor que otras tecnologías LPWAN.

2.1.2 Redes LPWAN privadas

Las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) no celulares ofrecen una alternativa a las LPWAN celulares, operando de forma independiente de la infraestructura de las redes móviles. Estas tecnologías utilizan sus propias redes para proporcionar conectividad a dispositivos IoT, lo que les otorga mayor flexibilidad y control sobre la implementación y el costo.

Las LPWAN no celulares son especialmente adecuadas para aplicaciones que requieren un bajo consumo de energía, una amplia cobertura y un costo reducido. Entre las tecnologías más destacadas se encuentran LoRaWAN, Sigfox, Mioty, DASH7, Ingenu o Weightless. Cada una de ellas presenta características y capacidades únicas que las hacen aptas para diferentes casos de uso.

A continuación, la Tabla 2.2 presenta una comparativa que resume las principales características de las más relevantes, facilitando la comprensión de sus diferencias y aplicaciones más adecuadas. Tras la tabla, se amplia la descripción con más detalle.

SigFox

Sigfox ([6]), a diferencia de soluciones como LTE-M y NB-IoT, que se apoyan en la arquitectura LTE, se basa en una red propietaria diseñada específicamente para aplicaciones IoT que priorizan el coste y la eficiencia energética. Es decir, Sigfox funciona como un proveedor de comunicaciones privado, cuyo modelo de negocio se fundamenta en el arrendamiento de la infraestructura que ha desplegado a escala global. Esta tecnología resulta particularmente apta para aplicaciones IoT que se caracterizan por requisitos de baja velocidad de datos y una comunicación poco frecuente.

En el ámbito de las especificaciones de radio, Sigfox opera en la banda ISM sin licencia, concretamente en 868 MHz en Europa y 902 MHz en América del Norte. Cada canal Sigfox tiene un ancho de banda de 100 Hz. Esta banda ultra estrecha es clave para lograr un bajo consumo de energía y una alta sensibilidad del receptor. En cuanto a la modulación, Sigfox emplea principalmente DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) y GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) para la transmisión de datos.

Tabla 2.2: Comparación de tecnologías LPWAN privadas

	LoRaWAN	Sigfox	Mioty	DASH7	Ingenu (RPMA)	Weightless
Frecuencia	Sub-GHz	Sub-GHz	Sub-GHz	Sub-GHz	2.4 GHz	Sub-GHz
Topología	Estrella bidireccional	Estrella unidireccional	Estrella unidireccional	Punto a punto, malla	Estrella bidireccional	Estrella, malla
Ancho de banda	125 kHz - 500 kHz	100 Hz	100 kHz		1 MHz	ND
Tasa de datos	Adaptativa (kbps)	Muy baja (bps)	Baja (kbps)	Baja (kbps)	Alta (cientos de kbps)	Adaptativa (200 bps a Mbps)
Latencia	Variable	Alta	Baja	Variable	Baja	Variable
Alcance	Largo (km)	Muy largo (km)	Largo (km)	Medio (cientos de metros)	Largo (km)	Corto-medio (cientos de metros)
Consumo de energía	Bajo	Ultra bajo	Ultra bajo	Ultra bajo	Bajo	Bajo
Complejidad	Media	Baja	Media	Baja	Alta	Media
Aplicaciones	Medidores inteligentes, agricultura, ciudades inteligentes	Sensores remotos, alarmas	Industria 4.0, logística	Telemetría, automatización	IoT industrial	Smart Cities

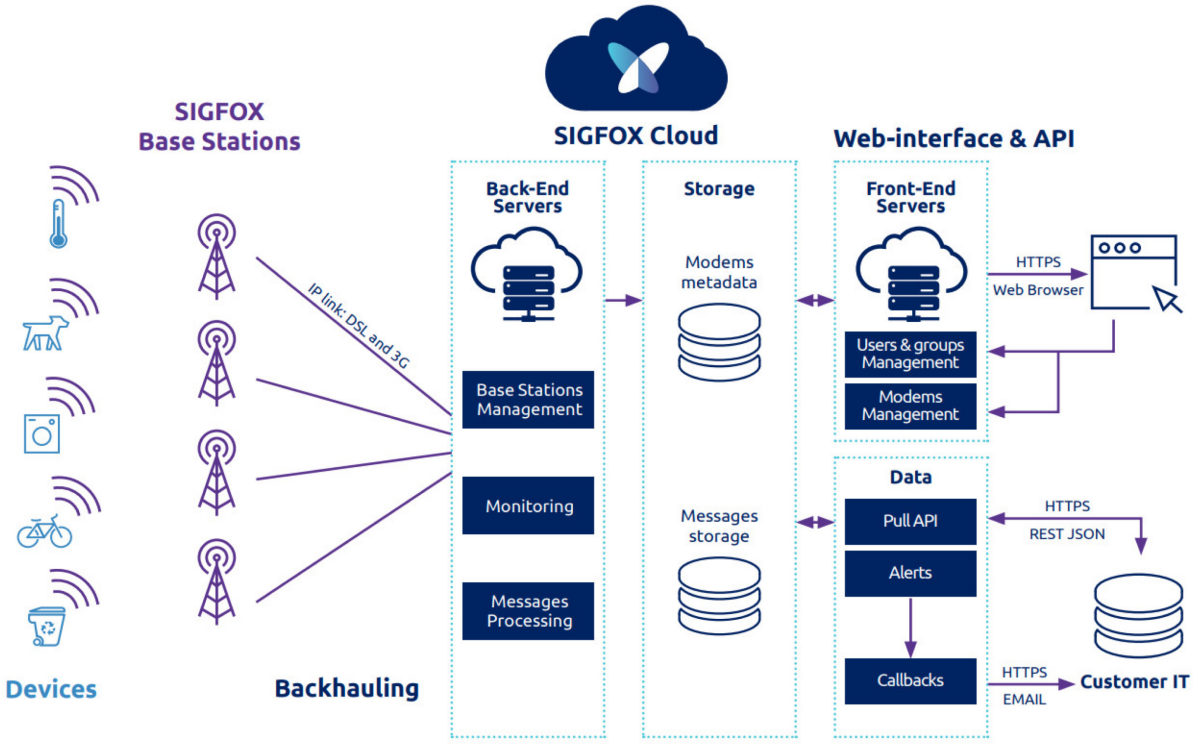


Figura 2.3: Arquitectura de red Sigfox (Sigfox Technical Overview - May 2017)[6]

Estas modulaciones ofrecen una buena eficiencia energética y robustez frente al ruido. Adicionalmente, para mitigar interferencias y mejorar la robustez de la señal, Sigfox implementa una técnica de saltos de frecuencia. El transmisor realiza un cambio de canal en cada mensaje, distribuyendo la energía de la señal en un rango más amplio de frecuencias.

En lo que respecta a la arquitectura de red de la Figura 2.3, Sigfox adopta una topología en estrella, donde los dispositivos se comunican directamente con estaciones base que abarcan un área geográfica extensa. La ausencia de nodos intermedios y enrutamiento complejo simplifica la red y reduce la latencia. Las estaciones base Sigfox, dispositivos de baja potencia y bajo coste, reciben las señales emitidas por los dispositivos IoT.

Estas estaciones base están conectadas a la red Sigfox a través de Internet y reenvían los mensajes a su plataforma en la nube. Gracias a la alta sensibilidad de las estaciones base y al uso de la banda de frecuencia sub-GHz, Sigfox puede alcanzar hasta 50 km en zonas rurales y 10 km en zonas urbanas. Cada estación base Sigfox tiene la capacidad de gestionar un gran número de dispositivos, lo que permite una alta densidad de dispositivos en una misma área.

En el plano del protocolo de comunicación, Sigfox emplea un protocolo propio, diseñado para minimizar la sobrecarga y el consumo de energía. Los mensajes son muy cortos, con un límite de 12 bytes de carga útil por mensaje.

Aunque ofrece un modo de comunicación bidireccional, está limitado a pequeños paquetes de datos (8 bytes de downlink por mensaje) y con una mayor latencia, por lo que en la practica se asume una comunicación unidireccional desde el dispositivo hacia la red, lo cual puede resultar suficiente para muchas aplicaciones de monitorización. También implementa mecanismos para proteger la integridad y la confidencialidad de los datos, incluyendo la autenticación de dispositivos y el cifrado de mensajes.

A pesar de sus ventajas, Sigfox también presenta limitaciones. La velocidad de datos es extremadamente baja, alcanzando solo 100 bps, lo que la hace adecuada únicamente para aplicaciones que requieren la transmisión de pequeñas cantidades de datos. La latencia es relativamente alta, lo que no la hace adecuada para aplicaciones que requieren una respuesta en tiempo real. La comunicación unidireccional en su modo básico, aunque funcional para muchas aplicaciones, limita la interacción y el control en tiempo real. Además, la dependencia de la red Sigfox restringe la flexibilidad de los dispositivos y genera dependencia de un único proveedor.

DASH7

DASH7 Alliance Protocol (D7A) es un protocolo de red de sensores y actuadores inalámbricos de código abierto que opera en las bandas ISM sin licencia de 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. Diseñado para aplicaciones de IoT que requieren una larga duración de la batería, un amplio alcance y una comunicación robusta, DASH7 se basa en un conjunto de estándares abiertos y especificaciones técnicas que garantizan la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes.

DASH7 está diseñado para operar en entornos difíciles y desafiantes. Su robustez se basa en una modulación de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS) que proporciona resistencia a las interferencias y al desvanecimiento multipath, un problema común en entornos con muchos obstáculos. La comunicación se basa en un esquema de acceso al medio basado en eventos, lo que significa que los nodos solo transmiten cuando tienen datos que enviar o cuando reciben una solicitud específica. Esto minimiza el consumo de energía y permite que los dispositivos funcionen durante años con una sola batería. DASH7 se destaca por su bajo consumo, con una latencia típica de 1 segundo y un consumo de energía promedio de solo 30uA. Además, ofrece una velocidad de transferencia de datos de hasta 167 kbit/s, lo que lo distingue de otras tecnologías LPWAN. Sin embargo, el alcance real de estos radioenlaces lo sitúan a caballo entre redes WLAN y las LPWAN, los costes de implementación no están definidos y la adopción y popularidad de esta tecnología está muy por debajo que otras propuestas como LoRaWAN o Nb-Iot.

mioty

Mioty, abreviatura de "Massive IoT", es una tecnología LPWAN no celular desarrollada por la empresa alemana Fraunhofer IIS. Mioty se caracteriza por la técnica de acceso al medio denominada Telegram Splitting Ultra Narrow Band (TS-UNB), con la que consigue una alta eficiencia y escalabilidad.

En cuanto a sus características técnicas, Mioty opera en la banda de frecuencia sub-GHz sin licencia. La técnica TS-UNB divide los mensajes en pequeños fragmentos que se transmiten a través de diferentes canales de frecuencia y tiempo, incrementando la robustez de la comunicación frente a las interferencias y posibilitando la escalabilidad a un número sustancial de dispositivos. Esta tecnología exhibe una alta capacidad, pudiendo soportar miles de dispositivos por gateway y cubrir áreas extensas con una sola infraestructura de red con un bajo consumo de energía. Soporta la transmisión de datos desde los dispositivos hacia la red, así como la recepción de comandos de control, por tanto soporta canales bidireccionales. En el ámbito de la seguridad, Mioty implementa mecanismos como el cifrado de extremo a extremo y la autenticación de dispositivos, con el fin de proteger la integridad y la confidencialidad de los datos.

A pesar de sus beneficios, Mioty también presenta desventajas. Al ser una tecnología relativamente nueva en comparación con otras LPWAN, su ecosistema aún se encuentra en desarrollo. La disponibilidad de módulos y dispositivos compatibles con Mioty puede ser limitada en algunas regiones. Además, Mioty compite con otras tecnologías LPWAN mucho mas asentadas y con gran penetración en el mercado, como LoRaWAN y NB-IoT.

Weightless

Weightless opera en diversas bandas de frecuencia sub-GHz, tanto licenciadas como no licenciadas, con variaciones geográficas y de implementación. Las bandas comunes incluyen 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. En cuanto a la modulación, Weightless emplea técnicas de modulación de baja potencia, como la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) y la modulación por desplazamiento de fase (PSK), cuya selección depende de la variante de Weightless y los requisitos de la aplicación. Las velocidades de datos se mantienen modestas, típicamente en el rango de unos pocos Kbps (desde 200-400 bps hasta Mbps según la variante), lo que resulta suficiente para muchas aplicaciones IoT que transmiten datos de forma intermitente y en pequeñas cantidades. Los protocolos de comunicación se caracterizan por su simplicidad y optimización para el bajo consumo de energía y el largo alcance, definiendo cómo los dispositivos se conectan a la red, transmiten datos y gestionan la energía. La topología de red se adapta a diversas configuraciones, incluyendo redes en estrella, redes en malla y redes híbridas, cuya selección depende de los requisitos de la aplicación y la infraestructura disponible. La seguridad se integra a través de mecanismos para proteger la integridad y la confidencialidad de los datos transmitidos, abarcando cifrado, autenticación y verificación de la integridad.

La familia Weightless se ramifica en distintas variantes, cada una diseñada para satisfacer necesidades de aplicación particulares. Weightless-P, la variante original, se enfoca en aplicaciones que demandan bajo consumo de energía y largo alcance, empleando modulación FSK y operando en bandas de frecuencia no licenciadas. Weightless-N, por otro lado, adopta modulación PSK y ofrece velocidades de datos superiores, dirigiéndose a aplicaciones que requieren un mayor ancho de banda. Por último, Weightless-W utiliza una banda de frecuencia licenciada y está concebida para aplicaciones que exigen mayor fiabilidad y seguridad.

El abanico de aplicaciones típicas para Weightless es amplio, abarcando el monitorización ambiental de parámetros como temperatura, humedad y calidad del aire; el seguimiento de activos como contenedores, vehículos y equipos; la agricultura inteligente con supervisión de condiciones del suelo y riego; ciudades inteligentes con seguimiento del alumbrado público y el tráfico; e Industria 4.0 con seguimiento de equipos industriales.

Weightless exhibe ventajas notables, como el bajo consumo de energía que permite años de funcionamiento con una sola batería, el largo alcance que proporciona una cobertura extensa, el bajo costo que facilita el despliegue a gran escala, y la flexibilidad que se adapta a diversas necesidades de aplicación. No obstante, también presenta limitaciones, como las bajas velocidades de datos que pueden no ser suficientes para algunas aplicaciones, y un desarrollo menor en comparación con otras tecnologías LPWAN más populares.

Ingenu

Ingenu es una tecnología LPWAN propietaria, con enfoque en el rendimiento y la fiabilidad para aplicaciones IoT críticas que requieren una alta capacidad de datos, baja latencia y una calidad de servicio garantizada.

A diferencia de otras tecnologías LPWAN que priorizan el bajo consumo de energía y el largo alcance, Ingenu se centra en proporcionar una conectividad robusta y de alto rendimiento para aplicaciones industriales, empresariales y con requisitos críticos.

Ingenu emplea la técnica de acceso al medio Random Phase Multiple Access (RPMA). Este método se basa en la transmisión de señales con fases aleatorias para minimizar colisiones e interferencias, lo que se traduce en una mayor eficiencia espectral y una mejor escalabilidad en comparación con otras tecnologías LPWAN. Ingenu opera en la banda de frecuencia sin licencia de 2.4 GHz, la misma utilizada por Wi-Fi y Bluetooth. Esta elección le permite aprovechar la infraestructura existente y los dispositivos disponibles en el mercado, aunque también implica una mayor susceptibilidad a interferencias.

Ingenu ofrece una mayor tasa de datos y una menor latencia en comparación con otras tecnologías LPWAN, principalmente al trabajar en una banda superior al sub-Ghz, lo que la hace adecuada para aplicaciones que requieren una transmisión de datos más rápida y eficiente. También implementa mecanismos de seguridad avanzados, como cifrado de extremo a extremo y autenticación de dispositivos, para garantizar la integridad y confidencialidad de los datos. La red Ingenu se gestiona de forma centralizada, lo que permite un control preciso sobre la calidad de servicio, la seguridad y el rendimiento de la red.

Entre las ventajas de Ingenu destacan su alto rendimiento, que ofrece una mayor tasa de datos y una menor latencia en comparación con otras tecnologías LPWAN; su escalabilidad, que le permite soportar un gran número de dispositivos en una misma red; su seguridad robusta, que implementa mecanismos de seguridad avanzados para proteger los datos; y su gestión centralizada, que permite un control preciso sobre la calidad de servicio y el rendimiento de la red.

En cuanto a las desventajas, su disponibilidad es limitada, ya que la red Ingenu no está disponible en todas las regiones, lo que puede restringir su adopción en algunos mercados. Además, Ingenu compite con otras tecnologías LPWAN que ofrecen una mayor cobertura y un ecosistema más maduro. El coste de implementación de la red Ingenu puede ser mayor en comparación con otras tecnologías LPWAN que utilizan espectro sin licencia, lo que podría representar una barrera para algunos usuarios.

2.2 Tecnología de comunicaciones seleccionada: LoRaWAN

LoRaWAN (véase su última especificación [7]) es un protocolo de red que usa la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos LoRa. Se compone de dos partes principalmente: gateways y nodos. Los primeros son los encargados de recibir y enviar información a los nodos; y los segundos son los dispositivos finales que envían y reciben información hacia el gateway.

Las tecnologías LoRa y LoRaWAN encuentran su aplicación ideal en una variedad de escenarios que comparten características comunes.

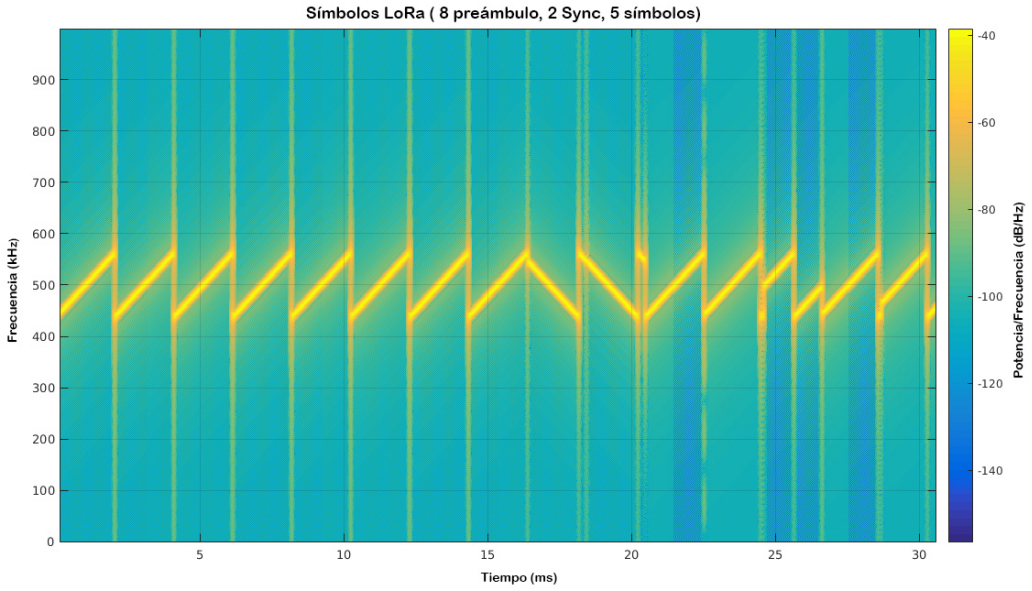


Figura 2.4: Modulación LoRa

Uno de los principales ámbitos de aplicación son las redes de sensores, ya sea en entornos urbanos, rurales o industriales, donde la capacidad de conectar un gran número de dispositivos de forma inalámbrica y con un bajo consumo de energía es fundamental.

Estas redes permiten la recopilación de datos ambientales, la monitorización de infraestructuras y la gestión eficiente de recursos, entre otros usos. Su enfoque en la transmisión de datos de baja tasa las hace idóneas para aplicaciones de telemetría, control remoto y monitorización de variables, donde la eficiencia energética y el alcance son prioritarios sobre el ancho de banda. La capacidad de LoRa y LoRaWAN para proporcionar una localización precisa y un seguimiento continuo (en combinación con GNSS), incluso en áreas con poca cobertura celular, las convierte en una herramienta valiosa en sectores como la logística, la seguridad y la gestión de flotas.

LoRaWAN está diseñado para operar en entornos difíciles y ofrece una excelente robustez. La tecnología LoRa subyacente utiliza una técnica de espectro ensanchado (CSS) que la hace resistente a las interferencias, siendo capaz de recuperar señales incluso por debajo del nivel de ruido. La modulación LoRa funciona enviando datos en forma de "chirps" ('Compressed High Intensity Radar Pulse'), que son señales de radio que varían su frecuencia linealmente con el tiempo (véase [8]). La velocidad a la que varía la frecuencia se conoce como *Spreading Factor* (SF). Esto permite que LoRaWAN funcione de manera confiable en áreas con mucha interferencia de radio, como entornos industriales o urbanos.

LoRaWAN es especialmente útil en el despliegue de redes privadas en lugares donde la conexión a servicios en la nube es limitada o inexistente, o donde la cobertura celular es escasa. Su capacidad para operar de forma autónoma y crear redes locales las hace ideales para zonas remotas, proyectos agrícolas y aplicaciones industriales en entornos aislados.

Otro aspecto clave frente a otras soluciones LP-WAN es que LoRaWAN ofrece un soporte de enlace descendente confiable y eficiente, que es crucial para muchas aplicaciones de IoT. El soporte de enlace descendente permite a la red enviar datos a los dispositivos, como comandos de control, actualizaciones de firmware ([9]) o notificaciones.

LoRaWAN también se beneficia de un ecosistema de código abierto muy activo. Hay disponible una variedad de software de código abierto para la gestión de redes LoRaWAN, como ChirpStack, que proporciona una interfaz web para administrar gateways, dispositivos y aplicaciones, así como para configurar la integración de datos con los principales proveedores de la nube y bases de datos. El ecosistema de código abierto permite un desarrollo más rápido y una mayor flexibilidad.

En cuanto a relevancia en el mercado, LoRaWAN está experimentando un crecimiento significativo. Según Global Market Insights, el tamaño del mercado de LoRaWAN se valoró en $3.7 mil millones en 2024 y se espera que crezca a una tasa compuesta anual del 41.1% entre 2025 y 2034, por lo que se sitúa como la principal tecnología en penetración e implantación entre las LPWAN.

Por estas características diferenciales de robustez, alcance, versatilidad, bajo consumo, coste y facilidad de implantación, LoRaWAN es la tecnología seleccionada para los desarrollos propuestos en los siguientes capítulos.

Las principales características de LoRaWAN son:

- Topología estrella
- Alcance de 10 a 15km con LOS
- Encriptación AES 128
- Soporte para 3 clases de nodos
- Administración de dispositivos
- Redes públicas y privadas
- Bajo consumo y largo alcance
- Baja transferencia de datos (hasta 242 bytes)

La figura 2.5 describe los elementos que componen una red LoRaWAN clásica, en la que una serie de dispositivos finales o nodos se conectan a Gateways y estos envían todo a un servidor de red y un servidor de aplicación, que por medio de diferentes APIs entrega los datos al usuario en su plataforma de visualización y tratamiento de datos seleccionada.

- **Infraestructura:** se compone de los nodos finales y los gateways o concentradores LoRaWAN que se encargan transmitir información mediante la red de largo alcance LoRa.
- **Network Server:** proporciona la gestión de gateways y nodos finales, autenticación y autorización de nodos, cifrado de red, enrutamiento, adaptación de velocidades de datos, eliminación de paquetes duplicados e interfaz con aplicaciones.
- **Application Server**: aplicación que permite administrar y crear nodos en los network servers (provisionamiento y configuración de nodos). Además, con esta aplicación todos los datos que llegan a la red son entregados por medio de una API a cualquier aplicación final creada para un caso de uso concreto (capa de negocio).

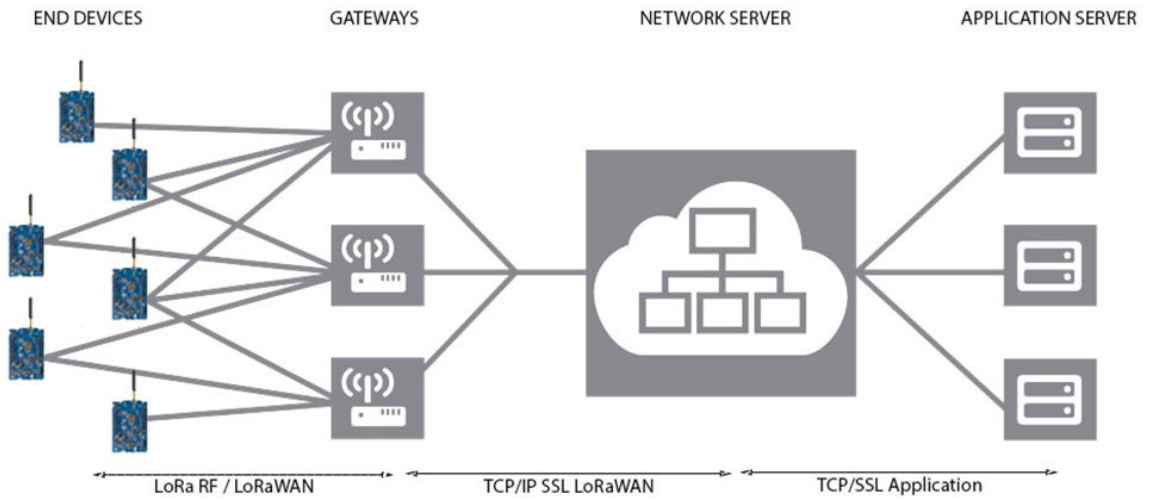


Figura 2.5: Estructura de red LoRaWAN. Adaptado de [10]

Dónde usar LoRa o LoRaWAN

- Redes de sensores en ciudades, campo o industria.
- Redes IoT con bajos requerimientos de velocidad o ancho de banda.
- Tracking de vehículos, animales o personas.
- Redes privadas que no requieren conectarse a servicios en la nube o donde no hay cobertura celular.

Los parámetros básicos de configuración de una red LoRaWAN son cruciales para optimizar su rendimiento y eficiencia, y su correcta elección depende de las necesidades específicas de la aplicación. Entre los parámetros más importantes, destacan el factor de dispersión (**SF**), el ancho de banda (**BW**) y la tasa de codificación (**CR**), cada uno de los cuales influye de manera significativa en el alcance, la velocidad de datos y la robustez de la señal.

- El factor de dispersión (SF) determina la robustez y el alcance de la señal LoRa. Un SF más alto (SF7 a SF12) proporciona un mayor alcance y una mejor resistencia a las interferencias, pero a costa de una menor velocidad de datos. Por el contrario, un SF más bajo permite una mayor velocidad de datos, pero reduce el alcance y la resistencia a las interferencias. La elección del SF dependerá, por tanto, de las necesidades específicas de la aplicación, debiendo equilibrar el alcance, la velocidad de datos y el consumo de energía.
- El ancho de banda (BW) define el rango de frecuencias utilizado para la transmisión LoRa. Un BW más amplio (125 kHz, 250 kHz, 500 kHz) permite una mayor velocidad de datos, pero reduce la sensibilidad del receptor y aumenta el consumo de energía. Por su parte, un BW más estrecho mejora la sensibilidad del receptor y reduce el consumo de energía, pero limita la velocidad de datos. La selección del BW dependerá de la cantidad de datos que se deban transmitir y de las condiciones del canal.
- La tasa de codificación (CR) añade redundancia a los datos transmitidos para mejorar la resistencia a errores. Una CR más alta (4/5, 4/6, 4/7, 4/8) proporciona una mayor protección contra errores, pero aumenta la longitud del mensaje y el tiempo

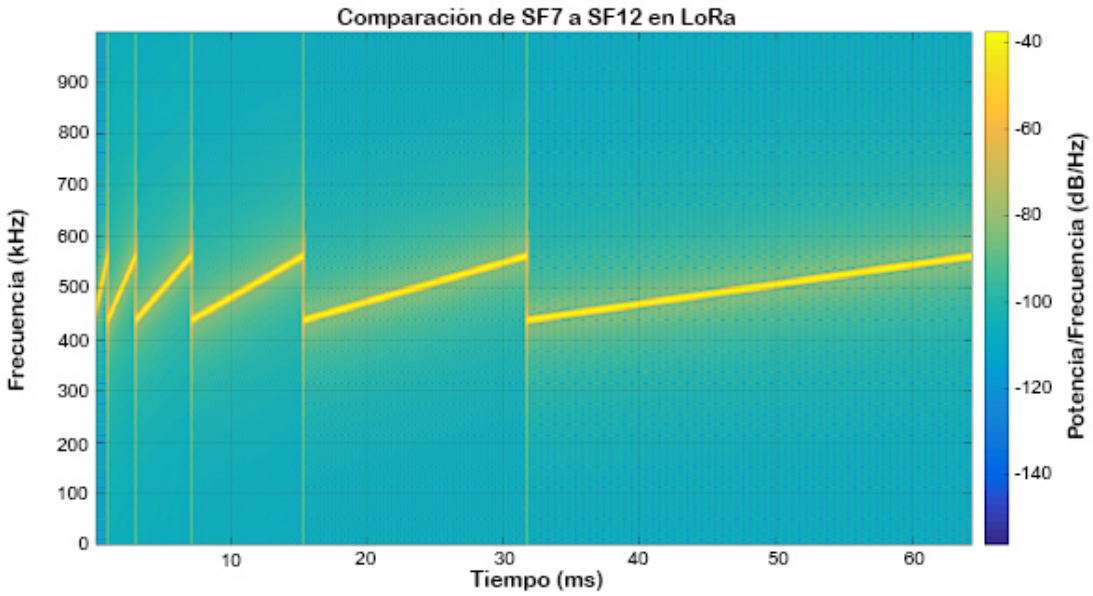


Figura 2.6: Comportamiento de la modulación LoRa según SF

de transmisión. En cambio, una CR más baja reduce la sobrecarga y el tiempo de transmisión, pero disminuye la resistencia a errores. La elección de la CR dependerá de la importancia de la integridad de los datos y de las condiciones del canal.

LoRaWAN opera en bandas de frecuencia no licenciadas, y los parámetros específicos varían según la región para cumplir con las regulaciones locales (véase [11] y tabla 2.3). En Europa, la banda de 868 MHz es la más comúnmente utilizada. Dentro de esta banda, existen especificaciones sobre:

- Bandas de Frecuencia: Rangos de frecuencia específicos para el enlace ascendente (uplink) y el enlace descendente (downlink). Por ejemplo, la banda de 868 MHz en Europa cubre desde 863 MHz hasta 870 MHz.

- Canales de Frecuencia: Frecuencias centrales específicas designadas para la transmisión. Se definen conjuntos de canales predeterminados. Por ejemplo, en la banda EU868 siempre deben soportarse los canales 868.1 MHz, 868.3 MHz y 868.5 MHz, y 869.525 MHz.

- Potencia de Transmisión (EIRP): Límites máximos de potencia de transmisión permitidos, medidos como Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (EIRP), para minimizar la interferencia con otros dispositivos. Por ejemplo, un límite común en la banda EU868 es +14 dBm.

- Factores de Propagación (SF): Conjunto de tasas de datos ortogonales. Los factores de propagación (SF) varían desde SF7 hasta SF12 en LoRaWAN.

- Canal de Enlace Descendente (Downlink): Frecuencia específica utilizada para la segunda ventana de recepción (RX2). Por ejemplo, 869.525 MHz es un canal de enlace descendente común en la banda EU868.

- Ciclo de Trabajo (Duty Cycle): Limitaciones sobre el porcentaje de tiempo que un dispositivo puede transmitir dentro de un período específico. Estas restricciones están

diseñadas para regular el uso del espectro radioeléctrico y evitar la congestión. Por ejemplo, un límite común de ciclo de trabajo es del 1%.

Tabla 2.3: Parámetros Regionales de LoRaWAN para Europa (EU868)

Parámetro	Valor/Rango
Banda de Frecuencia	863 - 870 MHz
Canales Típicos	868.1 MHz, 868.3 MHz, 868.5 MHz
PIRE Máxima	+14 dBm
Factores de Propagación	SF7 a SF12
Canal de Enlace Descendente	869.525 MHz
Ciclo de Trabajo	0.1%, 1%, 10%

Además de estos parámetros básicos, relacionados con la modulación y codificación LoRa, otras variables como temporizadores y sincronización para ventanas de recepción, o canales de frecuencia a utilizar según clase, serán abordadas en capítulos posteriores, ya que influyen en los desarrollos propuestos.

2.2.1 Tipos de comunicación, clases y dispositivos

Modo LoRa: comunicación punto a punto

En modo LoRa, los nodos pueden funcionar con una conexión punto a punto (P2P). La principal característica de este modo es que no se requiere un dispositivo intermediario que administre la comunicación. Los dispositivos pueden enviar información entre ellos directamente, por lo que es adecuado para comunicaciones sencillas y simples.

La otra manera es con un tipo de Mesh donde encontramos un nodo que se encarga de coordinar la red; sus desventajas son que está limitada a 255 redes de 255 nodos y a que el nodo coordinador solo puede escuchar a un solo nodo a la vez.

Modo LoRaWAN

En modo LoRaWAN, los nodos forzosamente se deben conectar a un gateway que soporta hasta 62,500 (asumiendo una baja tasa, de 1 paquete/día por nodo) y puede escuchar 8 nodos a la vez. Para poder unirse a la red y aprovechar las bondades del protocolo, el nodo debe enviar una serie de llaves de identificación y seguridad. Todos los nodos trabajan en conexión tipo estrella; los mismos nodos, aun estando en movimiento, se conectan al gateway más cercano y con mejor calidad de comunicación, muy similar a cómo funciona una red celular. En la práctica, la topología puede considerarse una “estrella de estrellas”, ya que varios GW (que permiten movilidad de nodos) conectan con un mismo Network Server.

Clases de nodos LoRaWAN

En el estándar LoRaWAN, los dispositivos finales se clasifican en tres clases (A, B y C) que definen su comportamiento en la comunicación bidireccional, especialmente en lo que respecta a la recepción de mensajes de enlace descendente (downlink). Cada clase ofrece un equilibrio diferente entre la latencia de la comunicación y el consumo energético, permitiendo adaptar el dispositivo a los requisitos específicos de cada aplicación. La tabla 2.4 muestra un resumen comparativo de estas clases descritas a continuación.

- **Clase A: (End-device Initiated)**

  La Clase A es la clase que describe el funcionamiento original y básico de un nodo, y obligatoria para todos los dispositivos LoRaWAN. Su funcionamiento se basa en una comunicación iniciada siempre por el dispositivo final. Después de cada transmisión de enlace ascendente (uplink), el dispositivo abre dos breves ventanas de recepción (RX1 y RX2) para escuchar posibles mensajes del servidor de red. Si no se recibe ningún mensaje en estas ventanas, el dispositivo vuelve a su estado de reposo (sleep) hasta la siguiente transmisión programada.

  Debido a que el dispositivo solo activa su radio para transmitir y durante estas cortas ventanas de recepción, la Clase A es la que ofrece el menor consumo energético de las tres. Esto la convierte en la opción ideal para dispositivos alimentados por batería que necesitan una autonomía de años y que solo envían datos de forma esporádica, como sensores de temperatura, humedad o contadores de agua. Su principal contrapartida es una alta latencia para la comunicación descendente, ya que el servidor debe esperar a que el nodo inicie la comunicación para poder enviarle un mensaje.

- **Clase B: Comunicación Planificada con Latencia Predecible (Beacon-enabled)**

  La Clase B introduce una mejora sobre la Clase A al permitir que el servidor de red inicie una comunicación downlink en momentos predecibles, sin tener que esperar a un uplink del dispositivo. Esto se logra mediante un mecanismo de sincronización basado en balizas (Beacons) periódicas que son emitidas por los gateways de la red.

  - Mecanismo de Sincronización: Los dispositivos de Clase B escuchan estas balizas para sincronizar sus relojes internos con la red. Este proceso de sincronización es crucial para la planificación de la comunicación.

  - Estructura Temporal: La comunicación se organiza en torno a un Beacon Period (128 segundos por defecto), que a su vez se divide en una Beacon Window, donde se abren las ventanas de recepción programadas.

  - Ping Slots: Dentro de la Beacon Window, el tiempo se divide en intervalos de recepción llamados ping slots. Cada dispositivo de Clase B tiene asignados una serie de ping slots periódicos durante los cuales activa su receptor para escuchar posibles mensajes del servidor.

  Esta clase ofrece un excelente equilibrio entre la disponibilidad para la comunicación descendente y la eficiencia energética, ya que el dispositivo solo necesita activarse durante las balizas y sus ping slots asignados. Es ideal para aplicaciones que requieren una latencia más baja que la Clase A, como el control de actuadores remotos (válvulas, relés) o sistemas de adquisición de datos mediante sondeo (polling).

Dado que la clase B es la planteada para habilitar un tráfico downlink independiente de los dispositivos (iniciado por el NS), es necesario introducir los parámetros temporales que marcan este tipo de acceso al medio. La comunicación de datos en el modo de clase B se basa en el *beacon period*, que se establece en 128 segundos, según el estándar. Un *beacon period*, como se ilustra en la figura figura 2.8, se divide en varias partes: *beacon reserved (br)* (2,12 segundos), *beacon guard (bg)* (3 segundos) y *beacon window (bw)*(122,88 segundos).

- **Clase C: Comunicación Continua de Mínima Latencia (Continuously Listening)**

  La Clase C está diseñada para aplicaciones que requieren la mínima latencia posible en la comunicación descendente. Para lograrlo, la ventana de recepción del dispositivo permanece abierta de forma casi continua. La única interrupción ocurre cuando el dispositivo necesita realizar una transmisión de enlace ascendente (TX).

  Esta capacidad de escucha constante permite al servidor de red enviar un mensaje a un dispositivo de Clase C en cualquier momento con un retardo mínimo. Sin embargo, este beneficio tiene un coste energético significativo. La Clase C es la que presenta el mayor consumo de energía, lo que la hace adecuada casi exclusivamente para dispositivos que cuentan con una fuente de alimentación de red (no con baterías).

  Sus casos de uso se centran en aplicaciones de control industrial en tiempo real, sistemas de alarma críticos o infraestructuras de medición inteligente (smart metering) donde se necesita una interacción inmediata con el dispositivo.

Tabla 2.4: Tabla Comparativa Avanzada de Clases LoRaWAN

Característica	**Clase A**	**Clase B**	**Clase C**
Iniciador Downlink	Solo tras un uplink del nodo	Servidor, en momentos planificados	Servidor, en cualquier momento
Latencia Downlink	Alta (depende del nodo)	Media y predecible	Muy Baja
Consumo Energético	Muy Bajo	Bajo / Medio	Muy Alto
Mecanismo Clave	Ventanas RX1/RX2 post-uplink	Sincronización con Balizas (Beacon) y Ping Slots	Escucha continua (ventana RX siempre abierta)
Caso de Uso Típico	Sensores esporádicos con batería	Actuadores, polling programado	Control en tiempo real, dispositivos alimentados por red

La elección de la clase de dispositivo depende de los requisitos de la aplicación en términos de latencia, consumo de energía y capacidad de recepción de mensajes de enlace descendente. Es importante destacar que existe una relación entre el consumo de energía y la latencia en LoRaWAN. La Clase A prioriza el bajo consumo de energía, mientras que la Clase C prioriza la baja latencia.

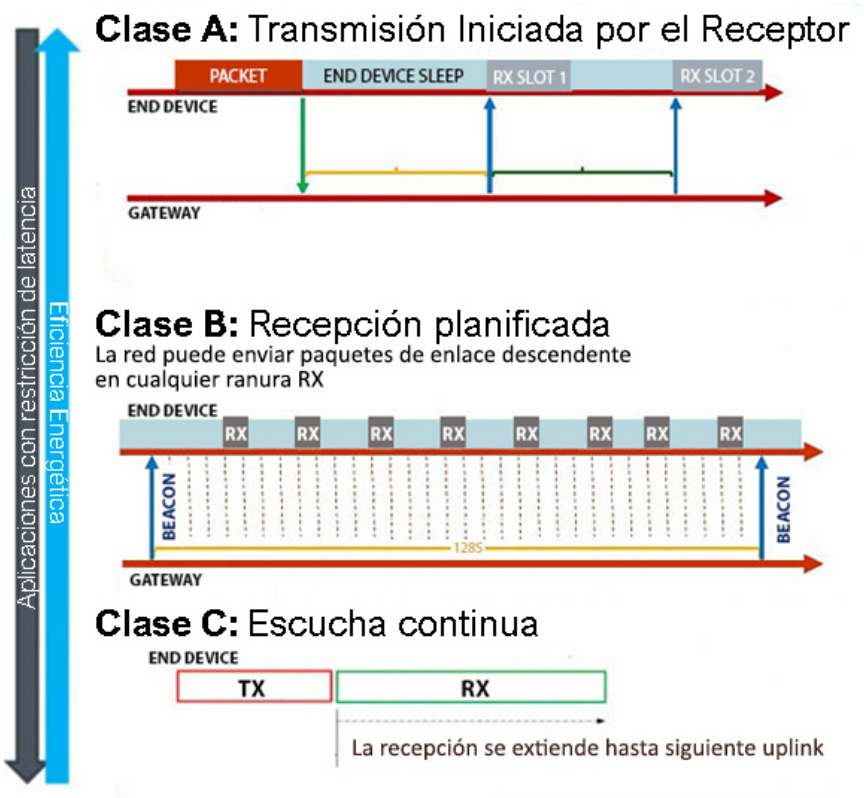


Figura 2.7: Clases A, B y C definidas en el estándar. Adaptado de [10]

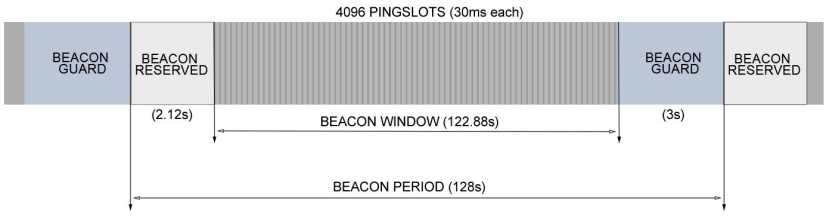


Figura 2.8: Parámetros temporales definidos por el modo de acceso al medio Clase B

Tipos de Gateway

El gateway es el concentrador al que se conectan todos los dispositivos en una red LoRaWAN, al igual que en una red wifi el Router o punto de acceso (AP) se encarga de recibir y enviar a internet la información de ordenadores, móviles y otros dispositivos inalámbricos. El Gateway se encarga,por tanto, de comunicarse de forma bidireccional vía LoRa con los nodos finales. Podemos encontrar:

- GW single channel: con solo un canal de recepción, por lo que limita mucho la cantidad de nodos soportados e incrementa los problemas de saturación y escalabilidad de la red. Por ello, solo se recomienda para prototipado y testeo.

- GW multichannel: siendo el modelo habitual el de 8 canales, se pueden encontrar equipos que soportan hasta 16 canales de recepción simultánea. En cualquier caso, el número de canales disponibles puede configurarse por software, y adecuarse a la normativa de cada región.

2.2.2 Comisionamiento de nodos

Existen dos maneras de conectarse a una red LoRaWAN. Para unirse a la red manteniendo la seguridad se requieren una serie de claves e identificadores que deben ser provisionados a cada nodo. Existen dos modos de unirse a una red LoRaWAN: OTAA y ABP ([12]).

Modo OTAA

El modo OTAA (Over-The-Air-Activation) es la manera más segura de conectarse a la red. Los parámetros de configuración son:

- *DevEUI*: Este es un identificador de fábrica, hace a cada dispositivo único. Esta configuración en algunos dispositivos se puede ajustar.

- *AppEUI*: Identificador de aplicación único utilizado para agrupar objetos. Esta dirección de 64 bits se, utiliza para clasificar los dispositivos por aplicación. Esta Configuración se puede ajustar

- *AppKey*: Es una clave secreta AES de 128bits compartida entre el dispositivo periférico y la red. Se utiliza para determinar las claves de sesión. Esta configuración se puede ajustar.

Con estos datos, la conexión se realiza de manera simple de la siguiente manera:

1. El nodo solicita un join (o inicio de sesión) a la red con los datos de configuración y abre la ventana de recepción.

2. El Gateway recibe la solicitud y la envía al servidor.

3. El servidor verifica que el nodo este dado de alta y la llave de encriptación sea correcta.

4. Si es correcta asigna una sesión temporal y la envía por medio del gateway al nodo, si los datos son incorrectos rechaza el join.

5. El nodo recibe la sesión temporal y puede enviar datos a la red.

La principal ventaja de la conexión tipo OTAA es la seguridad, ya que la sesión se crea la primera vez que se conecta el nodo a la red, pero se renueva cada vez que el dispositivo pierde la conexión, es apagado o reiniciado. Esto dificulta que alguien pueda robar la sesión y clonar el dispositivo.

Modo ABP

El modo ABP (Activation By Personalization) es el modo más sencillo de conexión, donde los parámetros de conexión son:

- *DevAddress*: Dirección lógica (equivalente a una dirección IP) que se utilizará para toda comunicación posterior con la red.
- *NetworkSessionKey*: Clave de cifrado entre el dispositivo y el operador utilizado para las transmisiones y para validar la integridad de los mensajes.
- *ApplicationSessionKey*: Clave de cifrado entre el dispositivo y el operador (a través de la aplicación) utilizada para transmisiones y para validar la integridad de los mensajes.

Con estos parámetros, la conexión se realiza de la siguiente manera:

1. El dispositivo envía datos hacia al Gateway
2. El Gateway válida que los datos corresponda a la sesión
3. Si es correcta la sesión se procesan los datos, sino se rechazan.

La principal ventaja de este tipo de conexión es que no se requiere hacer un join a la red para poder enviar datos, la confirmación del lado del servidor no es necesaria ya que la sesión ya está manualmente asignada, para dispositivos que están en movimiento o no tienen excelente recepción este tipo de conexión es idónea. La desventaja es que al encontrarse la llave de encriptación en el dispositivo pudiera ser extraída y clonada por una atacante.

2.2.3 Comandos de control y tipos de paquetes

Los paquetes LoRaWAN se componen de varias partes, cada una con una función específica. A continuación, se describen los componentes principales de un paquete LoRaWAN:

- Preámbulo: Además de cumplir la función de sincronismo, define el esquema de modulación de paquetes. Duración típica del preámbulo: 12.25 Ts.
- Encabezado (FHDR + $PHDR_{CRC}$): Contiene información sobre el tamaño del payload, si el CRC del payload de 16 bits está o no presente en la trama. Sólo los frames del enlace de subida contienen el campo CRC. Tamaño de 20 bits.
- Carga útil (PHY Payload): Contiene la información de la capa MAC.
  - MAC Header: Define la versión del protocolo, así como el tipo de mensaje.

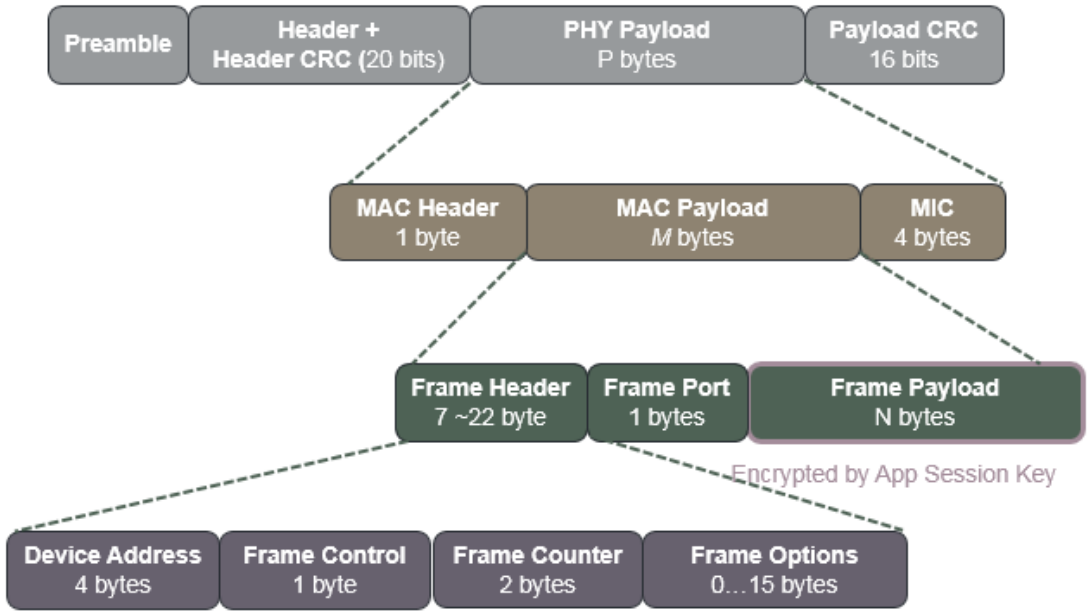


Figura 2.9: Formato de trama

  - MAC Payload: Contiene join-request o join-access, empleados en el proceso de activación de un dispositivo. El MAC Payload es gestionado por la capa de aplicación, está conformado por:

    * Frame Header: Dirección de dispositivo, Frame Control, Frame counter, Frame options.
    * Frame Port: Valor determinado según el tipo de aplicación.
    * Frame Payload: Datos a enviar a la red. Se cifra con la AppSKey mediante el algoritmo AES 128.

- Código de Integridad del Mensaje (MIC): Resultado de computar el header y payload MAC con una NwkSKey.

LoRaWAN utiliza dos tipos principales de paquetes: paquetes de datos y paquetes de control.

Paquetes de Datos

Los paquetes de datos transportan la información de la aplicación generada por los dispositivos LoRaWAN. Estos paquetes pueden contener datos de sensores, mediciones, o cualquier otra información relevante para la aplicación. En LoRaWAN 1.0.x, los paquetes de datos se cifran con AppSKey o NwkSKey, mientras que en LoRaWAN 1.1 se utiliza NwkSEncKey para cifrar los comandos MAC en el campo FRMPayload. LoRaWAN soporta dos tipos de mensajes de enlace ascendente y descendente para los paquetes de datos: confirmados y no confirmados. A lo largo de los siguientes capítulos se referencia también en ocasiones el tráfico ascendente y descendente también como uplink o downlink.

- **Mensajes confirmados:** Requieren una confirmación (ACK) del receptor. Esto aumenta la fiabilidad de la comunicación, pero también introduce un mayor overhead.

- **Mensajes no confirmados:** No requieren confirmación. Son más eficientes en términos de energía y ancho de banda, pero no garantizan la entrega del mensaje.

La elección entre mensajes confirmados y no confirmados depende de los requisitos de la aplicación en términos de fiabilidad y eficiencia.

Paquetes de Control

Los paquetes de control se utilizan para la gestión de la red y la comunicación entre dispositivos y la red. Estos paquetes transportan comandos MAC y otra información de control. Algunos ejemplos de información contenida en los paquetes de control incluyen:

- **Encabezado MAC:** Define la versión del protocolo y el tipo de mensaje.
- **Dirección del dispositivo:** Identifica la red y el dispositivo dentro de la red.
- **Control de trama:** Contiene información como la velocidad de subida, ACK, y la disponibilidad de más datos para transmitir.
- **Contador de trama:** Número de secuencia del paquete.
- **Opciones de trama:** Información para cambiar la configuración del dispositivo, como la velocidad de transmisión y la potencia de transmisión.

Los comandos MAC (Media Access Control) son instrucciones que se utilizan para controlar el comportamiento de los dispositivos LoRaWAN y la red. Se clasifican en comandos de enlace ascendente (dispositivo a red) y comandos de enlace descendente (red a dispositivo). El listado con los diferentes comandos posibles se muestra en la tabla 2.5:

Comandos de Enlace Ascendente:

Los comandos de enlace ascendente son enviados por los dispositivos LoRaWAN a la red para solicitar acciones o proporcionar información. Algunos ejemplos incluyen:

- **LinkCheckReq:** Solicita una verificación del enlace entre el dispositivo y la red.
- **DevStatusReq:** Solicita información sobre el estado del dispositivo, como la duración de la batería y la calidad del enlace.
- **RejoinReq:** Utilizado por un dispositivo para reiniciar la sesión con la red.

Comandos de Enlace Descendente:

Los comandos de enlace descendente son enviados por la red a los dispositivos LoRaWAN para configurar parámetros, solicitar acciones o proporcionar información. El servidor de red juega un papel crucial en la gestión del tráfico de enlace descendente y en el envío de comandos MAC a los dispositivos. Decide cuándo y cómo enviar mensajes de enlace descendente basándose en factores como la clase del dispositivo, la prioridad del mensaje y las condiciones de la red. Algunos ejemplos de comandos de enlace descendente incluyen:

Tabla 2.5: Comandos MAC disponibles en el estándar

Comando MAC	CID	Descripción
LinkCheckReq	0x02	Solicitud de verificación de enlace
LinkADRAns	0x03	Respuesta de adaptación de la tasa de datos de enlace
DutyCycleReq	0x04	Solicitud de ciclo de trabajo
RXParamSetupReq	0x05	Solicitud de configuración de parámetros de ventana de recepción
DevStatusReq	0x06	Solicitud de estado del dispositivo
NewChannelReq	0x07	Solicitud de nuevo canal
RXTimingSetupReq	0x08	Solicitud de configuración de tiempo de ventana de recepción
TXParamSetupReq	0x09	Solicitud de configuración de parámetros de transmisión del dispositivo final
DlChannelReq	0x0A	Solicitud de canal de enlace descendente
DeviceTimeReq	0x0D	Solicitud de hora del dispositivo
PingSlotInfoReq	0x10	Solicitud de información de ranura de ping
PingSlotChannelReq	0x11	Solicitud de configuración de canal de ranura de ping
BeaconFreqReq	0x13	Solicitud de frecuencia de baliza

- **LinkADRReq:** Solicita al dispositivo que cambie su velocidad de datos, potencia de transmisión o canal.
- **DutyCycleReq:** Establece el ciclo de trabajo del dispositivo para cumplir con las regulaciones.
- **RxParamSetupReq:** Configura los parámetros de recepción del dispositivo para las ventanas de recepción de Clase A.
- **NewChannelReq:** Añade un nuevo canal a la lista de canales del dispositivo.

Capítulo 3

Simulación de redes para LoRaWAN con modelo de ruido

3.1 Simuladores de red

Los simuladores de red son herramientas de software que permiten modelar, configurar y analizar el comportamiento de redes de comunicación sin necesidad de implementarlas físicamente. Básicamente, crean un entorno virtual donde se pueden representar los diferentes componentes de una red (routers, switches, servidores, clientes, etc.), los protocolos de comunicación que utilizan y el tráfico que fluye a través de ellos.

Los simuladores de red tienen una amplia gama de aplicaciones, entre las que destacan:

- Investigación y desarrollo: Permiten evaluar el rendimiento de nuevos protocolos y tecnologías de red antes de su implementación en sistemas reales, lo que ayuda a identificar posibles problemas y optimizar su diseño.
- Educación y formación: Son una herramienta valiosa para enseñar conceptos de redes, permitiendo a los estudiantes experimentar con diferentes configuraciones y observar su impacto en el rendimiento de la red de forma segura y controlada.
- Diseño y planificación de redes: Ayudan a evaluar el rendimiento de diferentes diseños de red y a tomar decisiones informadas sobre la selección de tecnologías y configuraciones antes de realizar inversiones en hardware.
- Análisis de seguridad: Permiten simular ataques y evaluar la eficacia de diferentes mecanismos de seguridad, lo que ayuda a identificar vulnerabilidades y mejorar la protección de la red.
- Pruebas y validación: Facilitan la prueba y validación de configuraciones de red complejas antes de su despliegue en producción, lo que reduce el riesgo de interrupciones y problemas de rendimiento.

Existen diferentes tipos de simuladores de red, cada uno con sus propias características y aplicaciones:

- Simuladores de eventos discretos: Modelan el funcionamiento de la red a través de eventos discretos que ocurren en instantes de tiempo específicos. Son muy flexibles y permiten simular una amplia variedad de protocolos y tecnologías. Ejemplos: ns-3, OMNeT++, ns-2.

- Emuladores de red: Permiten emular el comportamiento de dispositivos de red reales en un entorno virtual. Son útiles para pruebas y formación, pero su alcance es más limitado que el de los simuladores de eventos discretos. Ejemplos: GNS3, Packet Tracer.

- Simuladores híbridos: Combinan características de los simuladores de eventos discretos y los emuladores de red, ofreciendo un equilibrio entre flexibilidad y realismo. Ejemplos: EVE-NG, ns-3+QEMU.

La tabla 3.1 muestra las ventajas y desventajas de utilizar simuladores de red, ya que aunque a priori son una buena opción para validar desarrollos, existen algunos aspectos a tener en cuenta.

Tabla 3.1: Ventajas y Desventajas de los Simuladores de Red

Ventajas	**Desventajas**
Reducción de costes: Evitan la necesidad de adquirir y configurar hardware costoso.	Complejidad: Algunos simuladores pueden tener una curva de aprendizaje pronunciada y requerir conocimientos técnicos especializados.
Flexibilidad: Permiten simular una amplia variedad de escenarios y configuraciones de red.	Abstracción: Los simuladores, aunque potentes, son representaciones de la realidad y pueden no capturar todos los detalles y complejidades de una red real.
Seguridad: Proporcionan un entorno seguro y controlado para realizar pruebas y experimentos sin afectar a la red real.	Limitaciones de modelado: Algunos escenarios o tecnologías de red pueden ser difíciles o imposibles de modelar con precisión en un simulador.
Repetibilidad: Permiten reproducir experimentos de forma precisa y controlada, lo que facilita la comparación de resultados.	Costo de software: Aunque existen opciones de código abierto, algunos simuladores comerciales pueden ser costosos.
Escalabilidad: Facilitan la simulación de redes a gran escala que serían difíciles de replicar físicamente.	Tiempo de simulación: Las simulaciones complejas pueden requerir mucho tiempo de procesamiento.
Visualización: Muchos simuladores ofrecen herramientas de visualización que ayudan a comprender el comportamiento de la red.	Actualización constante: Las tecnologías de red evolucionan rápidamente, por lo que los simuladores deben actualizarse constantemente para mantenerse relevantes.

Sin embargo, al centrarse en la tecnología LoRaWAN, el espectro de simuladores se reduce a un conjunto más específico. Entre las opciones más recurrentes, destaca ns-3 por su robustez y flexibilidad.

Tabla 3.2: Comparación de Simuladores de Red

Simulador	Tipo	Licencia	Lenguaje	Ventajas	Desventajas
ns-3	Eventos Discretos	Código Abierto (GPLv2)	C++	Flexibilidad, extensibilidad, gran comunidad, modelos detallados	Curva de aprendizaje pronunciada, requiere conocimientos de C++
ns-2	Eventos Discretos	Código Abierto (GPLv2)	C++ y OTcl	Amplia base de usuarios, muchos modelos disponibles	Desarrollo detenido, código legacy, menos flexible que ns-3
OMNeT++	Eventos Discretos	Código Abierto (EPL) y Comercial	C++	Interfaz gráfica intuitiva, modularidad, buen soporte para redes inalámbricas	Curva de aprendizaje moderada, menos modelos disponibles que ns-3
OpNet Modeler	Eventos Discretos	Comercial	Lenguaje propio	Interfaz gráfica muy completa, amplia biblioteca de modelos, orientado a la industria	Costoso, código cerrado, menos flexible que ns-3
J-Sim	Eventos Discretos	Código Abierto (GPL)	Java	Fácil de aprender (Java), buena interfaz gráfica	Menos flexible que ns-3, comunidad más pequeña
GNS3	Emulación de Red	Código Abierto y Freemium	-	Permite emular dispositivos reales, útil para pruebas y formación	No es un simulador puro, limitado a dispositivos soportados
Packet Tracer	Emulación de Red	Propietario	-	Interfaz gráfica sencilla, ideal para aprender conceptos básicos de redes Cisco	Limitado a dispositivos Cisco, no es un simulador puro

No obstante, existen otras herramientas con diferentes grados de implementación de LoRaWAN, que merecen ser consideradas. A continuación, se presenta un breve resumen, para pasar a profundizar en la herramienta escogida ns-3.

- **ns-3 (Network Simulator 3):** Es un simulador de eventos discretos de código abierto dirigido principalmente a la investigación y educación en el área de redes de comunicación. Desde tecnologías de red cableadas hasta inalámbricas, como redes móviles y sistemas distribuidos, permite modelar, simular y analizar una amplia gama de protocolos y tecnologías de red.

- **OMNeT++:** Aunque su catálogo de módulos específicos para LoRaWAN es menos extenso que el de ns-3, la naturaleza modular y extensible de OMNeT++ permite la adaptación y el desarrollo de modelos personalizados de LoRaWAN, atendiendo a necesidades de simulación muy particulares.

- **J-Sim:** Con una flexibilidad menor en comparación con ns-3, J-Sim ofrece una compatibilidad con LoRaWAN más limitada. Aun así, la implementación de modelos básicos de esta tecnología es factible dentro de su entorno.

- **Simuladores comerciales:** Algunos simuladores comerciales podrían ofrecer soporte para LoRaWAN. Sin embargo, la disponibilidad y el alcance de esta funcionalidad dependen del proveedor y de la versión del software.

- **Simuladores académicos y de investigación:** En el ámbito académico, es común encontrar desarrollos específicos para el análisis de características concretas de LoRaWAN. Un ejemplo de esto es LoRa-MAB, un simulador flexible para la asignación de recursos de aprendizaje descentralizado en redes IoT, tal como se describe en [13]. Los simuladores de este tipo, se centran en problemas específicos, y aunque suelen carecer de la amplitud de herramientas que ofrecen los simuladores de propósito general, ofrecen una visión muy útil en los campos que estudian.

Entre los simuladores mencionados anteriormente, ns-3 es el más compatible con LoRaWAN por su flexibilidad. Ofrece varios módulos, generalmente desarrollados por la comunidad, que permiten validar varias implementaciones de LoRaWAN simulando todos los componentes de estas redes, desde los dispositivos finales hasta las pasarelas e incluso los servidores de red y de aplicaciones.

Por ejemplo, en [14] se evalúa la escalabilidad de las puertas de enlace LoRaWAN para la comunicación de Clase B utilizando el simulador ns-3.

Además, al ser completamente de código abierto, dichos módulos pueden ser adaptados y extendidos para evaluar escenarios específicos o implementar nuevas características de LoRaWAN. Por lo tanto, ns-3 es seleccionado como el candidato para los desarrollos de investigación relacionados con LoRaWAN en esta tesis.

Los componentes principales para trabajar con ns-3 son:

- Nodos: Representan los dispositivos de red, como routers, switches, servidores y clientes.

- Canales: Modelan los enlaces de comunicación entre los nodos, como cables Ethernet, enlaces inalámbricos y enlaces punto a punto.

- Dispositivos de red: Simulan las interfaces de red de los nodos, como tarjetas de red Ethernet o chips radio.
- Aplicaciones: Generan y consumen tráfico de red, como aplicaciones cliente-servidor, streaming o telemetría pub/sub.
- Modelos de protocolo: Implementan los diferentes protocolos de red, como TCP, UDP, IP, Ethernet, WiFi y LTE.
- *Helpers* de topología: Facilitan la creación de topologías de red comunes, como redes de bus, redes de estrella y redes de malla.
- Rastreadores o *tracers*: Permiten recopilar datos durante la simulación, como el retardo de paquetes, la tasa de pérdida de paquetes y el ancho de banda utilizado.

3.1.1 Simulación de redes LoRaWAN con ns-3

ns-3 ofrece un módulo específico para la simulación de redes LoRaWAN, que permite modelar y analizar el comportamiento de estas redes en diferentes escenarios. Los componentes principales del módulo LoRaWAN en ns-3 serían:

- **Modelo de canal:** ns-3 incluye modelos de canal realistas que simulan las características de propagación de la señal LoRa, como la atenuación, el desvanecimiento y el ruido. Esto permite evaluar el rendimiento de la red en diferentes entornos.
- **Modelo de dispositivo:** El módulo ofrece modelos para los diferentes tipos de dispositivos LoRaWAN (Clase A, B y C), incluyendo su comportamiento de transmisión y recepción, así como el consumo de energía.
- **Modelo de puerta de enlace:** Se pueden modelar puertas de enlace LoRaWAN con diferentes configuraciones, incluyendo su ubicación, capacidad de procesamiento y número de canales.
- **Protocolo MAC:** El simulador implementa el protocolo MAC de LoRaWAN, incluyendo el algoritmo de adaptación de velocidad de datos (ADR), el manejo de confirmaciones y la gestión de colisiones.
- **Servidor de red:** Se puede simular un servidor de red LoRaWAN para gestionar la comunicación entre los dispositivos y las aplicaciones.

La simulación de redes LoRaWAN en ns-3 implica una serie de etapas metodológicas que permiten construir un modelo representativo del comportamiento de la red. Este proceso, que requiere una comprensión detallada de los parámetros y mecanismos definidos por el estándar de LoRaWAN, abarca desde la configuración inicial del entorno de simulación hasta el análisis de los resultados obtenidos. A continuación, se describen los componentes y procesos clave involucrados en esta simulación.

1. **Instalar el módulo LoRaWAN:** El módulo LoRaWAN está disponible en la App Store de ns-3 y se puede instalar fácilmente.

2. **Configurar la topología de la red:** Definir la cantidad de dispositivos, puertas de enlace y su ubicación en el área de simulación. Se pueden utilizar diferentes modelos de distribución de nodos, incluyéndoles movilidad.

3. **Configurar los parámetros de la red:** Establecer los parámetros de la red LoRaWAN, como los canales usados, el SF, el ancho de banda y la potencia de transmisión.

4. **Configurar el comportamiento de los dispositivos:** Definir el tipo de dispositivo (Clase A, B o C), la tasa de generación de datos, el tamaño de los paquetes y otros aspectos como activar el algoritmo de ADR (Adaptive Data Rate).

5. **Configurar el modelo de canal:** Seleccionar el modelo de canal adecuado para el entorno de simulación y configurar sus parámetros.

6. **Ejecutar la simulación:** Ejecutar la simulación, definiendo el tiempo "real" de funcionamiento de red a representar, y recopilar datos sobre el rendimiento de la red, como la tasa de entrega de paquetes, la latencia, el consumo de energía y la tasa de colisiones.

7. **Analizar los resultados:** analizar los datos recopilados y evaluar el rendimiento de la red LoRaWAN en el escenario simulado.

Esta herramienta de simulación permite realizar diferentes experimentos para cada mecanismo de optimización propuesto, pudiendo así validar los desarrollos sin necesidad de un costoso despliegue:

- **Evaluación del rendimiento de la red en diferentes entornos:** Simular la red LoRaWAN en diferentes entornos, como áreas urbanas, rurales e industriales, para evaluar el impacto del entorno en el rendimiento de la red.

- **Análisis del impacto del ADR:** Simular la red con y sin ADR para analizar el impacto de este algoritmo en la tasa de entrega de paquetes, la latencia y el consumo de energía.

- **Estudio de la escalabilidad de la red:** Simular la red con un número creciente de dispositivos para evaluar su escalabilidad y determinar el número máximo de dispositivos que puede soportar.

- **Evaluación de diferentes mecanismos de polling:** Simular diferentes mecanismos de polling, para comparar su rendimiento en términos de latencia, consumo de energía y eficiencia de ancho de banda.

3.2 Fuentes de ruido e interferencias para el simulador

Uno de los aspectos clave a tener a considerar en los entornos propuestos es la caracterización de fuentes de ruido en escenarios industriales, con el objetivo de simular condiciones realistas y evaluar el rendimiento de los mecanismos y soluciones propuestas en entornos adversos.

En general, la caracterización del ruido en un entorno industrial requiere un análisis detallado de las fuentes de interferencia presentes y sus características específicas. Este análisis proporciona un punto de partida, centrándose en algunas de las fuentes más comunes y sus características

generales. Por ello, se centra en la interferencia generada por maquinaria y dispositivos electrónicos, describiendo las características generales de las fuentes de interferencia que se modelan en la simulación (véanse resumidas en la tabla 3.3):

- Variadores de velocidad: suelen utilizarse en aplicaciones más sencillas en las que el control de la velocidad de un motor eléctrico es el único requisito, pueden generar EMI (interferencias electromagnéticas) que interfieren con las comunicaciones inalámbricas.

- Variadores de frecuencia: se utilizan en aplicaciones más complejas que requieren un control preciso de la velocidad y el par, también pueden ser fuentes de ruido electromagnético.

- Generadores eléctricos: Los generadores de energía eléctrica, especialmente los que no están bien apantallados, pueden emitir señales de EMI que afectan a las comunicaciones.

Estos tipos de componentes electrónicos se encuentran en la maquinaria habitual de un escenario industrial: ventiladores, fresadoras, taladros, extrusoras, embaladoras, trituradoras, y un largo etcétera.

Las señales de ruido se caracterizan por diversas propiedades que determinan su impacto en los sistemas de comunicación. Estas propiedades incluyen:

- **Forma de onda:** Describe la forma de la señal de ruido en el tiempo. Puede ser sinusoidal, cuadrada, triangular, o una combinación compleja de diferentes formas.

- **Frecuencia:** Indica la velocidad a la que la señal de ruido oscila. Se mide en Hertz (Hz) y puede variar desde bajas frecuencias (como las generadas por la red eléctrica) hasta altas frecuencias (como las producidas por dispositivos electrónicos).

- **Duración:** Se refiere al tiempo que la señal de ruido está presente. Puede ser continua, intermitente o impulsiva, con ráfagas cortas de ruido.

- **Potencia/amplitud:** Indica la intensidad de la señal de ruido. Se puede medir en vatios (W) o en decibelios (dB). Una mayor potencia o amplitud significa un ruido más fuerte.

- **Espectro:** Describe la distribución de la potencia del ruido en diferentes frecuencias. Puede ser de banda estrecha, afectando solo a un rango limitado de frecuencias, o de banda ancha, afectando a un rango amplio de frecuencias.

Simular estas interferencias de forma precisa requiere modelar no solo la forma de onda del ruido, sino también su origen espacial, para conocer con mayor exactitud cuál es el impacto de su señal destructiva frente a otras señales en cada receptor de la red, ya que este ruido afectará tanto al tráfico ascendente como descendente. Esta propuesta describe un modelo de fuente de ruido industrial para ns-3, que se comporta como un nodo emisor de ruido, con una posición definida en el espacio de simulación, y emitiendo pulsos cuadrados configurables. Los pulsos cuadrados pueden modelar eficazmente los transitorios y componentes impulsivos presentes en las emisiones de EMI de los variadores y generadores. Al ajustar la duración, la amplitud y la frecuencia de los pulsos, se puede simular la naturaleza intermitente y abrupta de estas emisiones.

Tabla 3.3: Tipología de fuentes de interferencia en industria

Fuente de Ruido	**Forma de Onda**	**Frecuencia**	**Duración**	**Potencia**	**Efecto en LoRaWAN**
Variadores de velocidad	Compleja, con componentes de banda ancha, armónicos y ruido impulsivo	Desde bajas frecuencias (50/60 Hz) hasta altas frecuencias (MHz)	Continua o impulsiva	Depende del tamaño, potencia, carga y condiciones de funcionamiento del motor	Interferencia, reducción de la sensibilidad del receptor, aumento de la BER, disminución del alcance
Variadores de frecuencia	Compleja, con armónicos y transitorios	Rango de 1 kHz a 16 kHz, con posible ruido de alta frecuencia debido a la conmutación rápida	Continua	Depende de la potencia del variador, la frecuencia de conmutación y las características de la carga	Interferencia, reducción de la sensibilidad del receptor, aumento de la BER, disminución del alcance
Generadores eléctricos	Depende del tipo de generador (síncrono o asíncrono) y su diseño. Puede incluir armónicos, ruido de banda ancha e incluso ruido impulsivo si hay problemas de conmutación.	Principalmente en la frecuencia fundamental (50/60 Hz) y sus armónicos.	Continua mientras el generador está en funcionamiento.	Depende de la potencia del generador, la carga y las condiciones de funcionamiento.	Interferencia, especialmente si el generador está cerca del nodo LoRaWAN y el ruido se encuentra en la misma banda de frecuencia. Puede causar reducción de la sensibilidad del receptor, aumento de la BER y disminución del alcance.

Además, se han considerado factores ambientales y aspectos prácticos de la implementación, como el estudio del ruido electromagnético en redes IoT industrial realizado [15], y la investigación [16] sobre el uso de LoRaWAN en aplicaciones industriales de IoT en interiores.

El modelo de fuente de ruido se implementa como una nueva clase de nodo en ns-3. Este nodo tendrá las siguientes características:

- Herencia de ns3-Node: Heredará de la clase base Node de ns-3, lo que le permite integrarse en la simulación como cualquier otro nodo.
- Movilidad: Se le asociará un modelo de movilidad (por ejemplo, ConstantPositionMobilityModel para una fuente fija, o modelos más complejos si se desea simular ruido proveniente de fuentes móviles). Esto define su posición en el espacio.
- Dispositivo de Red "Ficticio": Aunque no es un nodo LoRaWAN real (no envía datos), necesitará un "dispositivo de red" asociado (NetDevice). Este dispositivo será especial:
  - No tendrá una dirección MAC.
  - Su única función será generar la señal de ruido (pulsos cuadrados).
  - Estará conectado a un canal (Channel) de ns-3. Podría ser un canal genérico (e.g., SimpleChannel) o, idealmente, un LoraChannel para aprovechar el modelo de propagación LoRaWAN existente. Si se usa un LoraChannel, habrá que desactivar la parte de modulación/demodulación LoRaWAN para este nodo, ya que solo emite ruido.
- Generación de Ruido: El dispositivo de red "ficticio" contendrá la lógica para generar los pulsos cuadrados con los parámetros configurables, como se ve en 3.2 (Amplitud, T_{on}, T_{off} distribuciones).
- Transmisión: En cada paso de tiempo, el dispositivo de red "ficticio" transmitirá la muestra de ruido generada. Esta transmisión significa que la muestra de ruido se propagará a través del canal, sujeta al modelo de propagación, hasta llegar a los receptores LoRaWAN.
- Recepción: Los nodos LoRaWAN reales recibirán la señal combinada: la señal LoRaWAN deseada más la señal de ruido propagada desde el nodo interferente, como se muestra en la figura 3.1. En ese caso, se asume que además de la propia señal interferente, en el canal encontraremos un ruido de tipo AWGN, o Ruido Blanco Gaussiano Aditivo. Este modelo de ruido es ampliamente utilizado para simular y analizar sistemas de comunicación, ya que representa adecuadamente muchas fuentes de ruido térmico e interferencias aleatorias. Se caracteriza por ser aditivo, lo que significa que se suma a la señal original; blanco, indicando que su densidad espectral de potencia es constante en el ancho de banda considerado; y gaussiano, reflejando que su amplitud sigue una distribución normal o gaussiana. El modelo de propagación se encargará de atenuar y retardar tanto la señal como el ruido, basándose en la distancia y otros factores del entorno. La capa PHY del receptor LoRaWAN calculará el SNR resultante y determinará si el paquete se recibe correctamente.

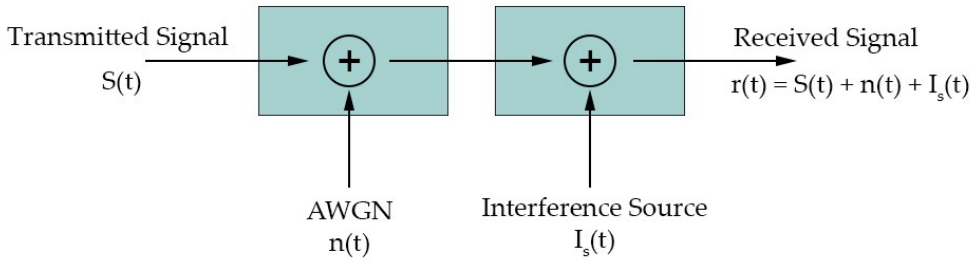


Figura 3.1: Bloques del sistema que caracteriza el ruido sobre la señal

La señal propuesta en la figura 3.2 representa una fuente de interferencia fuerte y repetitiva destinada a probar la saturación en la red simulada, con el fin de validar la implementación de las fuentes de ruido desarrolladas.

Con esta configuración de señal, como se esperaba, la red no puede operar porque la potencia y la duración de la interferencia hacen que los receptores no puedan recuperar paquetes válidos.

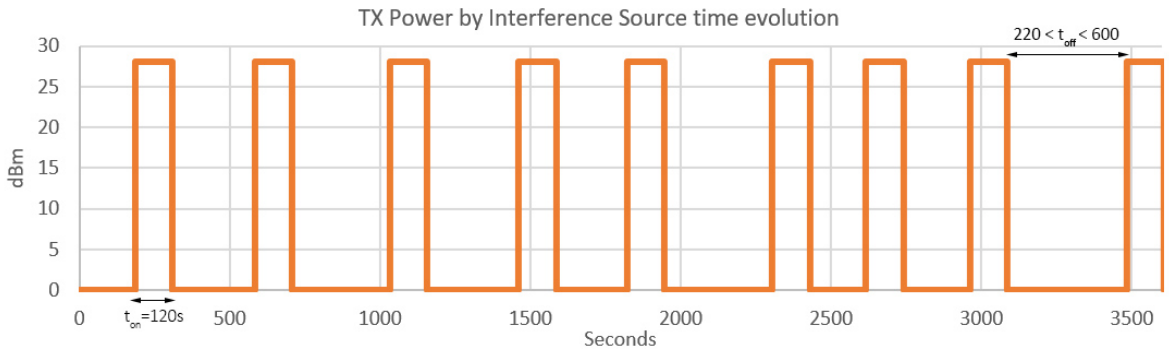


Figura 3.2: Señal interferente durante 1 hora

Una vez validados, esos nodos generadores de interferencias se configuran con señales que pueden aparecer con mayor frecuencia, con t_{on} del orden de cientos de milisegundos, y con niveles de potencia más bajos. La elección de señales de interferencia que puedan representar fuentes reales se realiza asumiendo que estos eventos aparecen durante períodos de tiempo más cortos, como turnos de personal. Esto puede ocurrir, por ejemplo, dos o tres veces al día. Durante estos períodos de mayor ruido debido a interferencias, la señal tiene una duración de t_{on} de 150 ms, que está dentro del rango de valores medidos para los tipos de fuentes descritos anteriormente.

La figura 3.3 muestra la señal interferente generada durante un minuto por una de las fuentes de ruido, en un período con alta actividad de maquinaria y trabajadores.

Simulaciones en Escenario Industrial LoRaWAN con Fuente de Ruido Espacial

Se ha simulado un entorno industrial rectangular de 2000 metros de largo por 500 metros de ancho (ver figura 3.4), incorporando el modelo de fuente de ruido industrial espacial desarrollado según la propuesta anterior a la simulación.

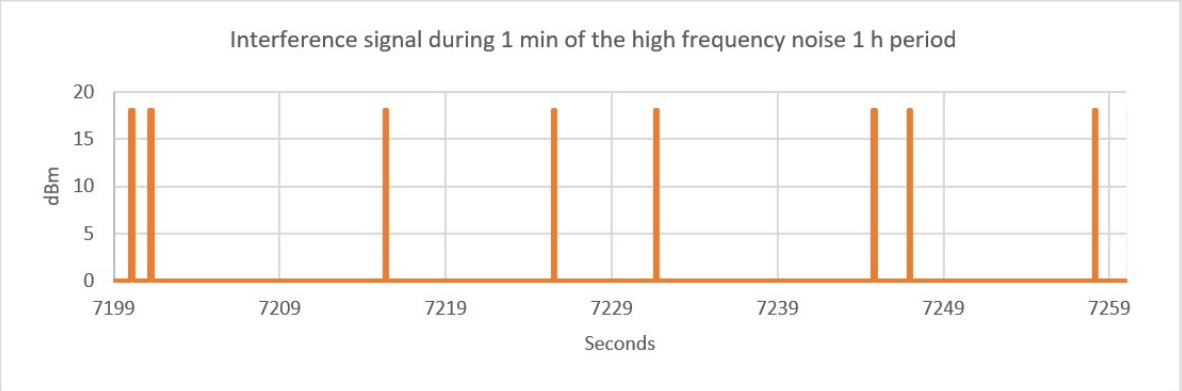


Figura 3.3: Ruido durante un minuto en periodo de alta interferencia

Se propone un modelo de propagación de pérdida de trayectoria de distancia logarítmica modificado, con tres regiones de distancia (cercana, media y lejana). Cada región tiene su propio exponente de pérdida de trayectoria, lo que permite una representación más precisa de la atenuación de la señal en diferentes rangos de distancia del transmisor. Este modelo con tres regiones es más realista que el modelo log-distance simple, ya que permite que el exponente que representa las pérdidas del canal varíe con la distancia. En entornos industriales, es común que la atenuación sea menor a cortas distancias (zona cercana, línea de vista), aumente en la zona media (obstrucciones parciales) y sea aún mayor a largas distancias (múltiples obstrucciones y difracción).

$$PL(d) = \begin{cases} L_0 + 10 \cdot n_1 \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right), & \text{si } d \leq d_1 \\ L_0 + 10 \cdot n_1 \cdot \log_{10}\left(\frac{d_1}{d_0}\right) + 10 \cdot n_2 \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_1}\right), & \text{si } d_1 < d \leq d_2 \\ L_0 + 10 \cdot n_1 \cdot \log_{10}\left(\frac{d_1}{d_0}\right) + 10 \cdot n_2 \cdot \log_{10}\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + 10 \cdot n_3 \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_2}\right), & \text{si } d > d_2 \end{cases} \tag{3.1}$$

donde:

- $PL(d)$: La pérdida de trayectoria (Path Loss) en decibelios (dB) a una distancia d entre el transmisor y el receptor.
- L_0: La pérdida de trayectoria en dB a una distancia de referencia d_0. Esta se calcula generalmente usando la fórmula de espacio libre de Friis [17]: $L_0 = 20 \cdot \log_{10}(4 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot f/c)$, donde f es la frecuencia y c es la velocidad de la luz.
- d_0: La distancia de referencia (normalmente 1 metro).
- d: La distancia entre el transmisor y el receptor.
- n_1, n_2, n_3: Los exponentes de pérdida de trayectoria para las regiones cercana, media y lejana, respectivamente.
- d_1, d_2: Las distancias que marcan los límites entre las regiones cercana/media y media/lejana.

Sobre este escenario, representativo de una fábrica real, se han desplegado 200 nodos LoRaWAN (en la figura del escenario etiquetados como ED o end device) de manera uniforme, creando

una rejilla de 10 filas por 20 columnas. Se han numerado desde el origen de coordenadas en (0,0), ordenando en dirección primero vertical (primera columna nodos del 1 al 10), y luego horizontal (segunda columna nodos del 11 al 20, y así sucesivamente). Se han añadido cuatro fuentes de ruido, que se ubican a lo largo del eje longitudinal del área de simulación, con una separación de 500 metros entre ellas. Esto representa un escenario donde existen múltiples fuentes de ruido a lo largo de una línea de producción o un pasillo industrial, por ejemplo.

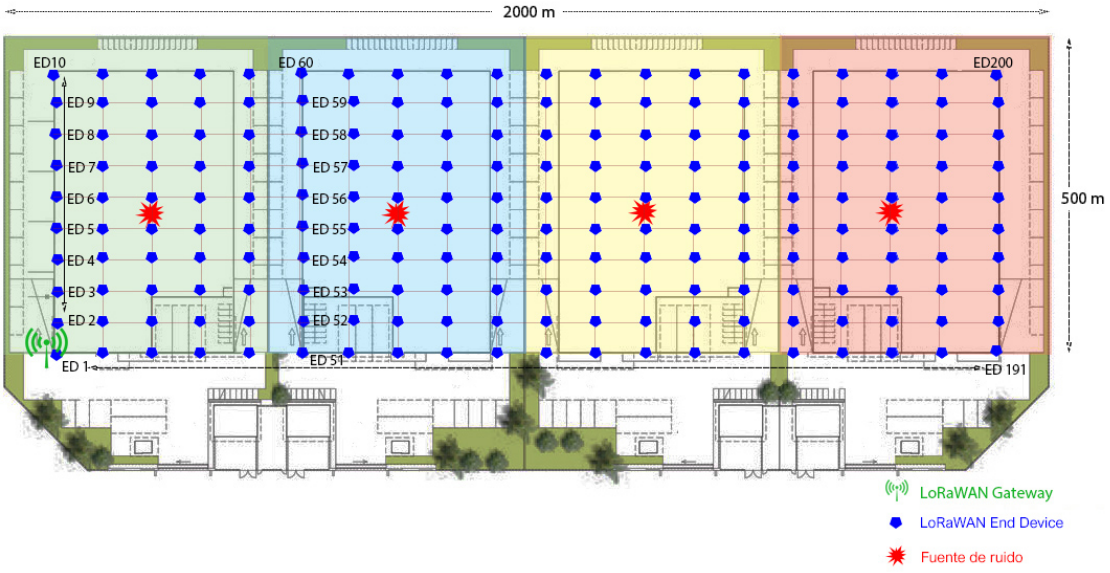


Figura 3.4: Escenario simulado con fuentes de interferencia

Se han realizado tres campañas de simulaciones para validar el efecto de las fuentes de ruido desarrolladas y comprender el impacto del ruido en el rendimiento de la red. Para ello, se analiza la potencia del ruido recibido en cada nodo. Se evalúan tres condiciones distintas. Inicialmente, se analiza un escenario con ausencia de interferencias, estableciendo así una referencia. Posteriormente, se simula un escenario de saturación de ruido, caracterizado por la recepción constante de la radio. Finalmente, se examina un entorno realista, donde se presentan pulsos de ruido transitorios.

Los 200 nodos de la red se configuran como clase B y sin generar tráfico propio, con el objetivo de poder monitorizar la señal de ruido recibida en todo momento, frente a la recibida desde el Gateway, que enviará un mensaje de 100 Bytes a cada nodo cada 128 segundos, por lo que es probable que los nodos tengan la radio a la escucha durante esos pulsos de ruido de duración 120 segundos.

La figura 3.5 muestra una gráfica de dispersión con tres conjuntos de datos: "$MAX_{noiseless}$", "$MAX_{saturated_noise}$" y "MAX_{real_noise}". Cada conjunto de datos representa la potencia de interferencia recibida máxima durante 24 horas por un nodo en función de su identificador en el mapa.

- $MAX_{noiseless}$ (naranja): Esta línea representa el nivel de ruido base en el sistema, sin interferencia adicional, es decir, con las 4 fuentes de ruido apagadas. Se mantiene relativamente constante en -90 dBm a lo largo de todos los nodos, y desciende hasta los -100 en algunos de los nodos más alejados.

Tabla 3.4: Parámetros de Configuración de la Simulación LoRaWAN en Entorno Industrial

Parámetro	**Valor(es) / Configuración**
Escenario	
Dimensiones del Área	2000m x 500m
Tipo de Entorno	Industrial (con obstrucciones)
Red LoRaWAN	
Número de Nodos	200
Distribución de Nodos	Uniforme
Clase	B
Tamaño paquete	100 B
Periodicidad tráfico descendente	128 s
Potencia de transmisión	14 dBm
Ubicación del Gateway (GW)	Origen de coordenadas (0m, 0m)
Modelo de Propagación	Log-Distance con Tres Regiones
Distancia de Referencia (d0)	1 m
Pérdida de referencia (L0)	Calculada (Fórmula de espacio libre)
Exponentes de Pérdida de Camino	Cercano(hasta d1) n1 = 2.0, Medio(hasta d2) n2 = 3.0, Lejano n3 = 4.0
Umbrales de distancia	d1 = 500m, d2=1000m
Desvanecimiento (Fading)	Distribución de Rayleigh
Fuentes de Ruido Industrial	
Número de Fuentes	4
Ubicación de las Fuentes (x,y)	(1750m, 250m), (1250m, 250m), (750m, 250m), (250m,250m)
Escenario saturado	
Amplitud del Ruido	27 dBm
Duración del Pulso (T_{on})	120 s
Tipo de distribución de tiempos (T_{off})	Uniforme (220 s a 600 s)
Escenario real	
Amplitud del Ruido	18 dBm
Duración del Pulso (T_{on})	150 ms
Tipo de distribución de tiempos (T_{off})	Uniforme (150 ms a 30 s)

- $MAX_{saturated_noise}$ (azul): Esta línea muestra el nivel de ruido con interferencia saturada, donde se han dejado las fuentes de ruido transmitiendo de forma continua, para comprobar que sucedería en el caso más negativo. Se observa una gran variación en la potencia de interferencia recibida por los nodos, con picos que superan los -40 dBm. Algunos nodos experimentan una interferencia mucho mayor que otros, debido a su posición relativa a las fuentes de ruido.

- MAX_{real_noise} (verde): Esta línea representa el nivel de ruido real en el sistema, utilizando la configuración de las fuentes de ruido con distribución uniforme descrita, e incluyendo tanto el ruido base como la interferencia. Se sitúa entre los dos conjuntos de datos anteriores, mostrando un nivel de ruido mayor que el ruido base, sobre todo en los nodos alejados, pero menor que el ruido saturado.

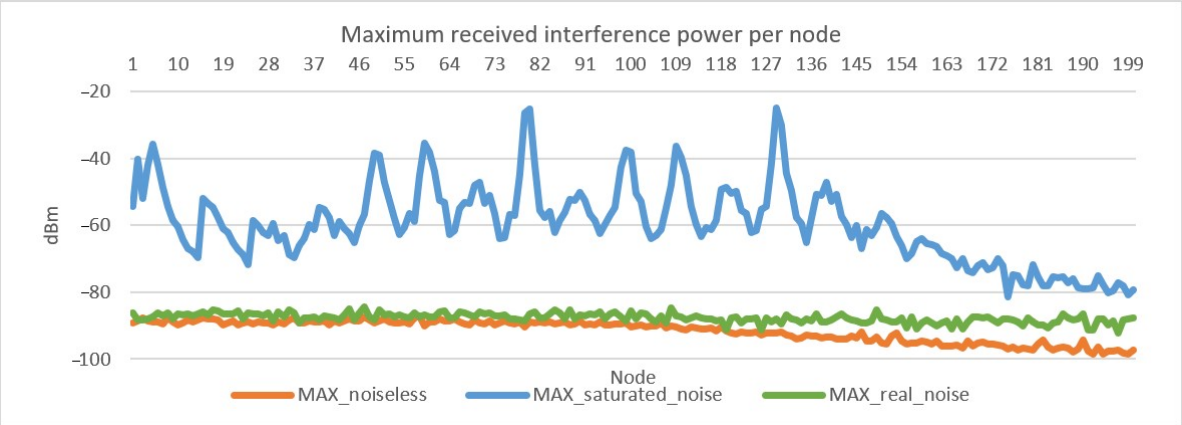


Figura 3.5: Resultados con la simulación de nodos interferentes

Es necesario recalcar dos consideraciones de importancia para la interpretación de estos resultados. En primer lugar, en términos de potencia recibida, el parámetro SF configurado no tiene impacto en los resultados, ya que sólo afecta al tiempo en el aire de los paquetes y al margen SNR para recuperar datos, por lo que el efecto de este parámetro se verá en el número de paquetes perdidos, pero no en el valor bruto de potencia recibida. En segundo lugar, y derivado de la explicación anterior, hay que tener en cuenta que el valor de potencia bruta de ruido no está directamente relacionado con la pérdida de paquetes, ya que depende también de la potencia recibida que contiene el paquete de información, y del margen SNR que hace que el nodo sea capaz de recuperar dicha información.

Tener un modelo de ruido realista es crucial para evaluar el impacto de propuestas como mejoras adaptando el ADR para el tráfico descendente o la planificación de la red, descritas en los capítulos siguientes, y que incorporan el modelo desarrollado de fuentes de ruido, y que complementarán los resultados obtenidos al mostrar un análisis más completo de una red funcional. Al simular escenarios con un modelo de ruido preciso, se puede observar de manera más efectiva cómo estas propuestas mitigan los efectos del ruido e interferencias, y mejoran el rendimiento general de la red. Esto permite tomar decisiones más informadas y optimizar las estrategias de mitigación de ruido.

Si bien este modelo de interferencia es una aproximación teórica, su diseño se fundamenta en las características empíricas de las perturbaciones electromagnéticas (EMI) documentadas en entornos industriales. La literatura, como la analizada en [15], evidencia que equipos como variadores de frecuencia y motores eléctricos generan un ruido que no es constante, sino de naturaleza impulsiva y de banda ancha. La modelización mediante pulsos cuadrados (ráfagas

de ruido de alta potencia y corta duración) captura eficazmente esta naturaleza transitoria, que representa el desafío más significativo para la capa física de LoRaWAN, ya que puede corromper tramas enteras de comunicación. Por tanto, aunque no se ha realizado una validación empírica directa en un entorno real, el modelo se ha configurado con parámetros (amplitud, duración y frecuencia) que buscan emular el peor escenario plausible derivado de estas fuentes, constituyendo así una base sólida y exigente para evaluar la robustez de los mecanismos de optimización propuestos.

Capítulo 4

Configuración adaptativa según calidad del enlace

4.1 Introducción

Para que la adopción de esta tecnología LoRaWAN sea realmente útil en el dominio industrial, existen algunos aspectos a tener en cuenta y barreras que superar. Al trabajar sobre un medio inalámbrico compartido, la comunicación entre los dispositivos y los gateways puede verse afectada por multitud de factores externos, y por tanto, la calidad de los enlaces puede cambiar constantemente durante todo el tiempo de vida de la red. Esto puede provocar uno de los grandes problemas, como es la pérdida de paquetes en la red, que se ve influenciada por la posición de los dispositivos. Otro problema habitual es el uso de la batería. Estos dispositivos deben tener una larga vida útil para poder tener una durabilidad de años, pero esto solo es posible con configuraciones y optimizaciones cuidadosas, y el que un dispositivo quede inactivo puede traducirse en una pérdida de información que puede tener graves repercusiones en el proceso industrial o en la analítica de datos.

El uso de una red LoRaWAN en escenarios industriales tiene sentido debido a la capacidad de esta red para desplegar un gran número de dispositivos conectados, teniendo en cuenta las capacidades limitadas de estos equipos y con un consumo energético reducido. Para mejorar el rendimiento de dicha red, se ha llevado a cabo la implementación del mecanismo Adaptive Data Rate (ADR) siguiendo la descripción del estándar. Este mecanismo ahorra recursos en el canal y ahorra batería al optimizar los parámetros de transmisión. Al adaptarse a las condiciones del canal cambiando los parámetros de transmisión, específicamente la tasa de datos o DR (Data Rate), también consigue una reducción de la congestión en zonas densas. La probabilidad de éxito o PDR (Packet Delivery Ratio) aumenta así considerablemente. La calidad de enlace es un factor determinante para las aplicaciones industriales de toma de datos, y comprendiendo los factores que afectan la calidad de enlace y adoptando las estrategias adecuadas, es posible construir redes inalámbricas robustas y confiables que soporten las demandas de la industria moderna.

La aplicación de un mecanismo ADR en el enlace descendente de una red LoRaWAN es de gran interés, especialmente cuando se consideran las limitaciones del estándar en este aspecto. Si bien el mecanismo ADR está definido para el enlace ascendente, donde los nodos adaptan su DR en función de las condiciones del canal, el estándar LoRaWAN no ofrece la misma flexibilidad para el enlace descendente.

En el enlace descendente, la tasa de datos para 'acknowledgments' (ACKs) y otros mensajes de control está fijada en SF9, lo que puede no ser óptimo en todas las situaciones. Esta limitación se debe a que el estándar busca garantizar la recepción de estos mensajes críticos, utilizando una tasa de datos robusta que ofrece un mayor alcance y resistencia a interferencias.

Sin embargo, en escenarios con buenas condiciones de canal, la utilización de SF9 para todo el tráfico de enlace descendente puede ser ineficiente. Un mecanismo ADR para el enlace descendente permitiría al gateway ajustar el DR de los mensajes en función de las condiciones del canal, lo que podría resultar en:

- Reducción del tiempo en el aire: Al utilizar una DR más alta (SF más bajo) cuando las condiciones del canal lo permitan, se reduce el tiempo que los nodos necesitan tener la radio activa para recibir los mensajes. Esto se traduce en un menor consumo de energía, lo que es crucial para dispositivos que funcionan con baterías.

- Mayor eficiencia del canal: Al optimizar el DR, se reduce la congestión del canal, permitiendo una mayor escalabilidad de la red y un mejor rendimiento general.

La optimización del mecanismo de ADR en LoRaWAN sigue siendo un área de investigación activa, buscando mejorar el rendimiento de la red a través de diversos enfoques, aunque suelen estar centrados en el tráfico uplink. Ya en [18] se analizó la agilidad del ADR, para conocer sus limitaciones y campos de mejora, y [19] muestra una revisión exhaustiva de las soluciones recientes y los principales desafíos en la optimización del ADR en LoRaWAN. Este estudio proporciona un contexto valioso para comprender las diversas estrategias que se han explorado en este campo.

Los investigadores en [20] proponen el algoritmo FADR, centrado en garantizar una distribución equitativa de las tasas de datos entre los nodos, abordando así el problema de la equidad en la red. En [21] también se propone una nueva estrategia de ADR para telemetría.

Por otro lado, la caracterización del canal de comunicación también ha sido objeto de estudio, como lo demuestra el trabajo en [22], que analiza la tasa de error de bits (BER) bajo modelos de desvanecimiento de canal de Nakagami y Rice. También en [23], se analizó cómo influye el modelo de canal y propagación de la señal para estimar las pérdidas. Estos análisis son relevantes para comprender las limitaciones del canal y optimizar la transmisión.

La optimización del rendimiento de la red también ha sido un foco importante, con propuestas como el algoritmo CA-ADR de [24], que considera aspectos en la contienda en el acceso al medio para mejorar la selección de la tasa de datos, y el esquema de planificación de [25] que busca reducir las colisiones.

También se han explorado enfoques innovadores como el uso de *deep learning* para el ADR, como se presenta en el trabajo de [26], que propone un esquema de ADR basado en este aprendizaje profundo.

La eficiencia energética, otro aspecto de interés que se considera en cada desarrollo de esta tesis, se aborda en [27] proponiendo un esquema de ADR eficiente en energía.

A pesar de estos avances, existe la necesidad de seguir optimizando el ADR, especialmente en comunicaciones bidireccionales. Por lo tanto, la implementación de un mecanismo ADR adaptado al enlace descendente como el propuesto a continuación ofrece la posibilidad de superar las limitaciones del estándar y optimizar la comunicación en función de las condiciones específicas del entorno.

Este capítulo aborda los aspectos de la tesis referentes a la implementación de un mecanismo de tasa de datos adaptativa bidireccional, validado mediante el simulador NS-3. Como se ha visto en el capítulo 3, esta herramienta de simulación permite caracterizar y validar a priori el funcionamiento de la red y optimizar los parámetros para reducir el consumo y las pérdidas mediante la configuración de algunos parámetros no fijados estrictamente por el estándar.

Esta implementación incluye el mecanismo no sólo para la comunicación de enlace ascendente, que es la seleccionada por el estándar, sino que también propone utilizar este mecanismo para la comunicación de enlace descendente, desde el gateway a los nodos, por lo que puede ayudar a optimizar nuevas aplicaciones a menudo pasadas por alto hasta ahora, donde los receptores de datos son los dispositivos finales, como actuadores, configuraciones de sensores, etc.

Por ejemplo, en un escenario en el que los dispositivos reciben alertas de mantenimiento procedentes de un sistema de análisis de datos, y en el que la red LoRaWAN propuesta se utiliza para apoyar las aplicaciones de adquisición de datos y eventos de alarma en plantas industriales en las que las comunicaciones están restringidas a las bandas sub-GHz.

El proceso de implementación de un mecanismo de Adaptive Data Rate (ADR) para enlace descendente se inició con una adaptación directa del mecanismo propuesto en el estándar LoRaWAN. Esta adaptación inicial permitió establecer una base funcional para el control del Spreading Factor (SF) en las comunicaciones de downlink. Posteriormente, para optimizar la responsividad y adaptabilidad del mecanismo, se introdujeron modificaciones significativas mediante técnicas de ventana deslizante. Estas técnicas permitieron que el sistema reaccionara de manera más ágil a los cambios en las condiciones del enlace, ajustando el SF de forma más dinámica y eficiente en comparación con el enfoque original estático.

4.2 Calidad de enlace en LoRaWAN: Tasa de Datos Adaptativa

La especificación LoRaWAN incluye la Tasa de Datos Adaptativa (ADR), un mecanismo que permite ahorrar recursos a la vez que se mejora la comunicación en condiciones difíciles. Este mecanismo optimiza el uso del tiempo de transmisión y el consumo de energía en los dispositivos finales. Por otro lado, son los propios dispositivos finales los que deciden si activar o no este mecanismo. La implicación de cambiar el DR impacta directamente en el SF utilizado por el dispositivo. Debido a la nomenclatura usada, cuando uno aumenta, el otro disminuye, como se puede observar en la tabla 4.1. La razón de que un SF más alto implique un DR más bajo procede de la modulación utilizada, presentada en la sección 2.2, ya que el SF determina el tiempo en el aire necesario para transmitir un paquete, y por tanto, cuanto más se tarda en transmitir la misma cantidad de bits, más bajo será el DR.

Si el dispositivo final decide activarlo, el mecanismo funciona de la siguiente manera: cuando se activa el mecanismo, los dispositivos inician un contador de transmisiones, que sirve de base para tomar decisiones, al mismo tiempo que configura el bit de ADR en los paquetes que transmite (uplink), indicándole al Network Server que el mecanismo de ADR está activo. En función del SNR de los paquetes recibidos, se plantean dos posibilidades:

Tabla 4.1: Requisitos de SNR para recepción en LoRa

DR/SF	SNR requerido (dB)
DR0/SF12	–20.0
DR1/SF11	–17.5
DR2/SF10	–15.0
DR3/SF9	–12.5
DR4/SF8	–10.0
DR5/SF7	–7.5

- Aumentar la potencia de transmisión: si es posible.
- Reducir DR: lo que equivale a aumentar el SF si la potencia ya está al máximo permitido.

Nótese que si bien los cálculos sobre las muestras de SNR recibidas se realizan en el Network Server, en el caso de que el dispositivo no obtuviera respuesta tras las transmisiones (en este caso 20), el mecanismo le permite incrementar el SF unilateralmente, para conseguir mejorar el alcance y, por tanto, llegar con éxito al gateway (véase figura 4.1).

Por otro lado, el NS registra la relación señal-ruido (SNR) de los paquetes recibidos por GW asignado a cada dispositivo. Tras recibir suficientes muestras (normalmente 20, pero puede modificarse), se calcula, para cada dispositivo, el margen de SNR comparando la SNR máxima registrada con los requisitos de recepción de paquetes y un margen predefinido para garantizar el funcionamiento a cada tasa de datos. Con estas operaciones, el GW puede informar (mediante un comando MAC) a cada dispositivo si puede aumentar la tasa de datos. El diagrama de flujo de la figura 4.2 resume el funcionamiento de este mecanismo.

En el caso de ADR, se utilizan dos comandos MAC principales:

- LinkADRReq: Este comando se envía desde el NS al dispositivo final para solicitar un cambio en los parámetros de transmisión. Contiene información sobre la nueva velocidad de datos, la potencia de transmisión, la máscara de canales y el número de transmisiones.
- LinkADRAns: Este comando se envía desde el dispositivo final al NS como respuesta al comando LinkADRReq. Indica si el dispositivo final ha aceptado o rechazado los nuevos parámetros de transmisión.

El primer paso es habilitar el mecanismo ADR para la implementación de módulos LoRaWAN ns-3, en la única implementación encontrada que admitía dispositivos de clase B en la red, pero a la que le faltaba incluir el ADR. Se han hecho algunas suposiciones para simplificar la implementación en este punto. Mientras que el mecanismo ADR estándar incluye aumentar o disminuir la potencia de transmisión cuando no se puede realizar ningún cambio de DR de acuerdo con las ecuaciones 4.1 y 4.2 y la tabla 4.1, esta implementación asume que los dispositivos están configurados para transmitir a la potencia máxima, que es de 14 dB según las regulaciones para la banda utilizada.

La implementación asume también que no se realizarán cambios en este parámetro durante la operación. Con respecto a los mensajes de enlace descendente, los ACKs en las ventanas destinadas RX1 y RX2, como se definen en los dispositivos de clase A, están deshabilitados,

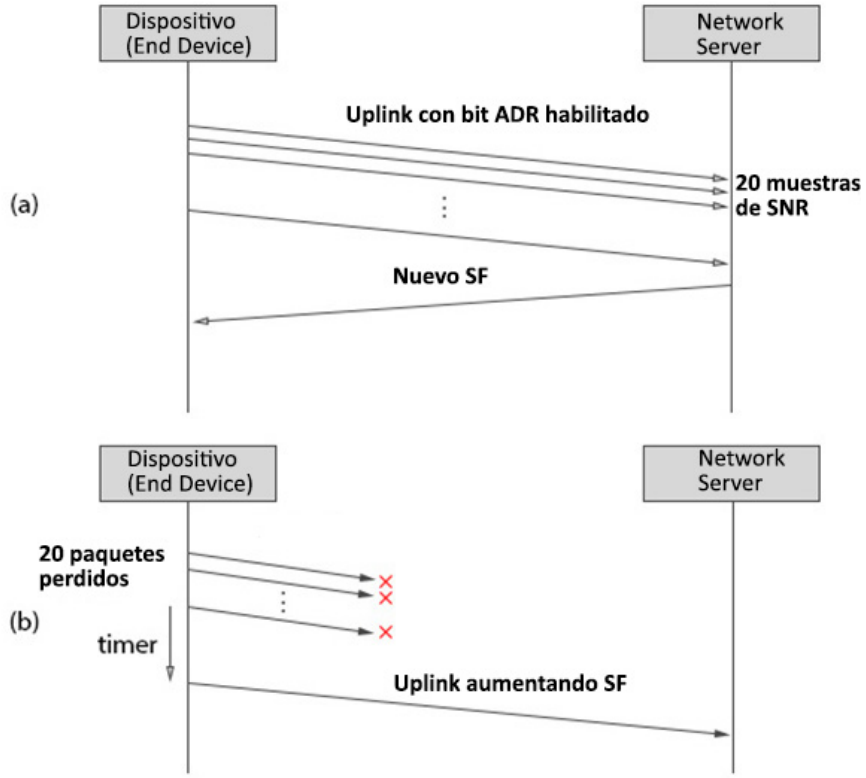


Figura 4.1: Selección de SF: (a) Posible Decremento de SF (b) Incremento de SF

ya que todo el tráfico de enlace descendente se realizará durante los slots habilitados por la operación del dispositivo en clase B.

$$SNR_{margen} = SNR_{max} - SNR_{requerido} - margen \tag{4.1}$$

$$N_{step} = round\left(\frac{SNR_{margen}}{3}\right)\begin{cases} < 0 & : \text{Incrementa Potencia 3dB} \\ \geq 0 & : DR = DR + 1 \text{ (hasta DR5)} \end{cases} \tag{4.2}$$

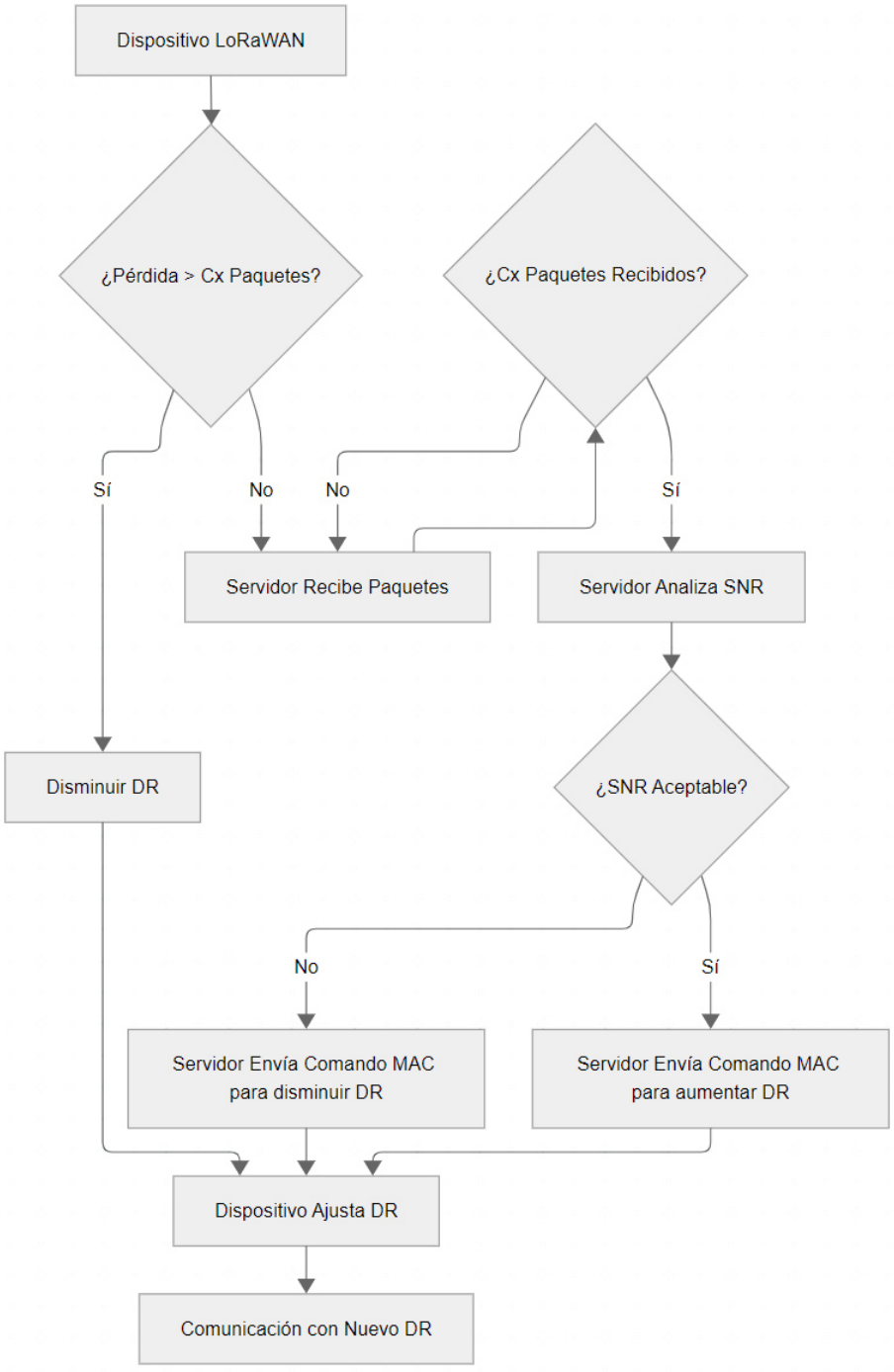


Figura 4.2: Mecanismo de ADR recomendado por el estándar, ejecutado en el NS (aumento de DR) o en el dispositivo (descenso de DR)

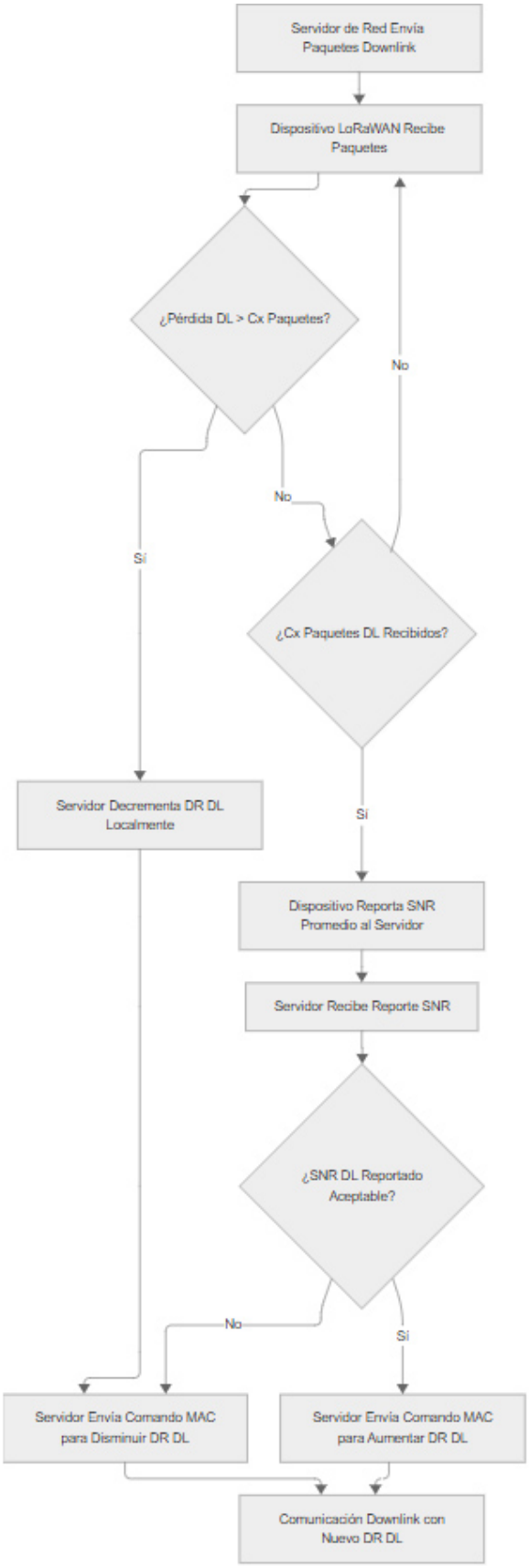


Figura 4.3: Mecanismo de ADR ajustado para tráfico descendente, ejecutado en el NS, informando a los dispositivos.

Siguiendo con esta aproximación, la primera versión de un ADR para el tráfico descendente contempla seguir los mismos pasos, pero en sentido inverso: el gateway es el que contiene una tabla con las estadísticas de sus paquetes enviados a cada nodo, y con la misma lógica del ADR, ajusta el SF en función del SNR requerido, como se muestra en la figura 4.3. En este caso, hay que resaltar que se fijan los posibles valores de SF limitando a un máximo de SF9, ya que a partir de SF10 el tiempo en el aire de los paquetes del tráfico descendente puede resultar en problemas de sincronización para la operativa en clase B.

El mecanismo ADR implementado establece el número de muestras de mensajes para calcular la SNR máxima como una variable que se puede cambiar (denominada C_x a partir de ahora), para probar las implicaciones de reducir este parámetro, lo que afecta al tiempo que tarda un nodo en cambiar su SF, y por lo tanto puede tener implicaciones en la tasa de entrega de paquetes (PDR) y el consumo de energía. El valor típico de C_x en las implementaciones de ADR, de acuerdo con las recomendaciones del estándar, es 20.

Para la implementación del ADR en enlace descendente, se ha introducido un comando MAC específico, denominado ***LinkADRReqB***, basado en el comando estándar *LinkADRReq*. Este nuevo comando conserva elementos clave del *LinkADRReq*, utilizando el ADR bit para indicar si el ADR está activo, y también el byte DataRate y TXPower. Sin embargo, en esta adaptación, el campo correspondiente a la potencia de transmisión (TXPower) se mantiene fijo. La parte del byte que originalmente indica la tasa de datos (DataRate) se reutiliza para indicar al nodo qué configuración de DR (o SF) debe emplear en los ping slots de escucha de Clase B que tiene asignados.

4.2.1 Escenario de pruebas

Se han realizado simulaciones que replican las características de una planta industrial real. Se eligió como ejemplo una planta de producción automotriz con dimensiones de 2000 metros por 500 metros y una altura de 10 metros, como la introducida en el capítulo 3. La figura 3.4 del capítulo 3.2 muestra el plano de la planta industrial, dividida en 4 grandes almacenes conectados, con 200 nodos distribuidos uniformemente en intersecciones de una cuadrícula de 100 metros por 54 metros, y el gateway ubicado en la esquina inferior izquierda (coordenadas 0,0). En este caso, la única diferencia con el escenario de la figura es que no se encuentran activas las 4 fuentes de ruido. Esta configuración permite simular el comportamiento en interiores, con paredes internas y externas, en un escenario realista. La ubicación del gateway se eligió para maximizar la distancia con el nodo más alejado, buscando obtener un peor rendimiento del canal y así observar el impacto del mecanismo ADR en el cambio de SF.

El tamaño de la carga útil elegido es de 21 bytes (13 bytes del protocolo LoRaWAN + 8 bytes de datos) para aumentar la probabilidad de recepción exitosa de los paquetes. La longitud del preámbulo es de 8 símbolos por defecto, como se indica en el estándar, aunque el número final de símbolos varía según el SF.

Una vez elegidos los tamaños de los paquetes, se procede al cálculo del tiempo en el aire de los mensajes LoRaWAN utilizando las ecuaciones 4.3 a 4.7, definidas en las guías de diseño de módem LoRa de Semtech. Este cálculo considera el tiempo de símbolo (tiempo para enviar chips a la velocidad de chip), el tiempo de preámbulo, el número de símbolos del encabezado y la carga útil del paquete.

$$T_{\text{preamble}} = (n_{\text{preamble}} + 4.25) \cdot T_{\text{sym}} \tag{4.3}$$

$$\text{payloadSymbNb} = 8 + \max\left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right\rceil \cdot (CR + 4), 0\right) \tag{4.4}$$

$$T_{\text{payload}} = \text{payloadSymbNb} \cdot T_{\text{sym}} \tag{4.5}$$

$$T_{\text{sym}} = \frac{2^{SF}}{BW} \tag{4.6}$$

$$\text{Air Time} = T_{\text{preamble}} + T_{\text{payload}} \tag{4.7}$$

Las abreviaturas utilizadas en las fórmulas son las siguientes:

- SF: Factor de dispersión (Spreading factor)
- PL: Número de bytes de la carga útil (payload)
- H: Cabecera opcional en la trama (header)
- DE: Tasa optimizada, puede ser 0 o 1, alterando la cantidad de símbolos necesarios para transmitir la carga útil
- CR: Code Rate, redundancia para corrección de errores

Al utilizar canales con un ciclo de trabajo permitido del 1%, en el mejor de los casos, con SF7, el tiempo en el aire es de 56,58 ms y el ciclo de trabajo permite enviar un mensaje cada 6 segundos. En el peor de los casos, con SF12, el tiempo en el aire es de 1482,75 ms y el ciclo de trabajo permite enviar un mensaje cada 2 minutos y 28 segundos. Por lo tanto, cualquier tasa de mensajes por encima de ese valor cumple con las regulaciones del ciclo de trabajo. Se han seleccionado unos valores realistas de entre 300 y 1800 segundos entre mensajes uplink, acompañados por un tráfico downlink correspondiente de entre 450 a 1950 segundos.

La red se simuló para los siguientes casos:

- Sin ADR con SF fijo.
- Implementación de ADR solo para clase A.
- Implementación de ADR para enlace descendente con dispositivos finales de clase B.

En primer lugar, se comprobó el correcto funcionamiento del mecanismo ADR implementado, analizando los cambios en el SF en función de la SNR, las posiciones de los dispositivos finales (ED) y el tiempo. Se fijó una periodicidad de enlace ascendente de un paquete cada 1800 segundos, y se configuró el mecanismo ADR con diferentes límites del contador de muestras para realizar el cálculo de la SNR máxima. Este estudio se lleva a cabo para comprobar los intervalos de tiempo y los retrasos en el cambio de SF, y posteriormente, comprobar el impacto en el PDR y el consumo de energía.

Partiendo de un estado inicial donde todos los dispositivos utilizan un SF12, la figura 4.4 muestra la evolución del número de dispositivos que alcanzan cada valor posible de SF durante las simulaciones según el contador C_x que indica el número de muestras de SNR utilizado. Como es lógico, los dispositivos que consiguen alcanzar SF7 son los que más tardan,con 270 minutos en el caso más rápido (C_x=5). En la tabla 4.3 se muestran los valores resultantes para todas las configuraciones.

Tabla 4.2: Parámetros de Simulación

PARÁMETROS	**VALOR**
Payload	8 bytes
Cabeceras	13 bytes
Tamaño total	21 bytes (13 bytes + 8 bytes)
Longitud del preámbulo	8 símbolos (predeterminado para la trama)
Factor de dispersión	SF7 a SF12
CR	4/5
Ancho de banda	125 KHz
Periodicidad uplink	300/900/1800 segundos
SNRsc	5, 10, 20 paquetes
Periodicidad downlink (clase B)	450/1050/1950 segundos
Nodos	200
Área	2000m x 500m
Potencia de transmisión	14dB
Corriente en modo Tx	28mA (para productos SX1272/76 a 14dB)
Corriente en modo Rx	10mA (típico para productos SX1272/76)
Clase de dispositivo LoRaWAN	Clase B

Como se observa, la evolución del SF para todas las configuraciones sigue la misma forma, solo que con intervalos de tiempo más largos o más cortos dependiendo del número de muestras (para la misma periodicidad de enlace ascendente, pero con un contador C_x de 20 muestras, se tarda hasta 720 minutos en llegar al SF óptimo).

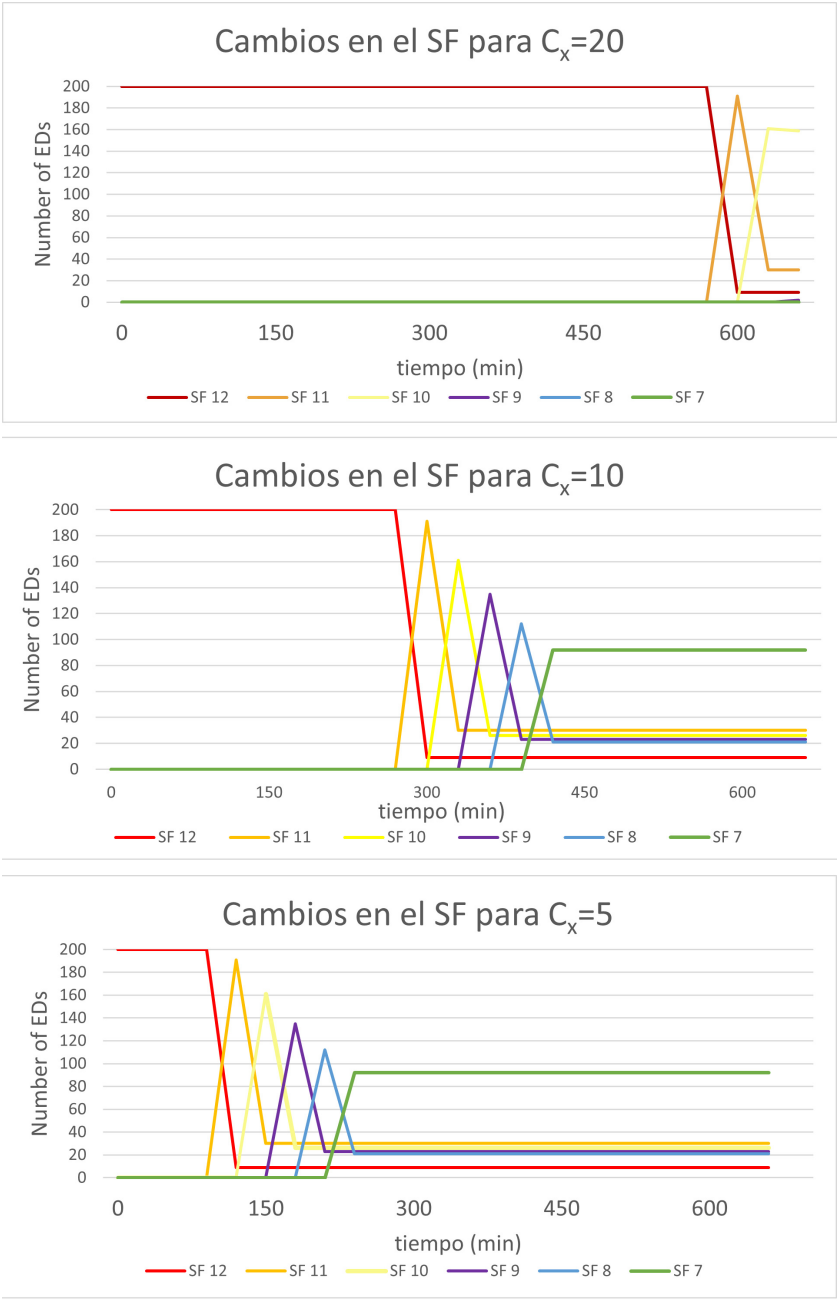


Figura 4.4: Cambios de SF en el tiempo según el valor de C_x

Tabla 4.3: Estadísticas de PDR con ADR o con SF fijo

Periodo mensajes	Uplink ADR	Uplink ADR primer almacén	Uplink primer almacén (SF12)	Uplink primer almacén (SF7)	Downlink ADR
300 s	93,90%	94,03%	70.94%	92,17%	99,26%
900 s	96,69%	97,11%	77,73%	95,93%	99,7%
1800 s	98,23%	98,08%	79,48%	96,55%	99,83%

4.2.2 Resultados de ADR para downlink basado en estándar

Los resultados muestran que los dispositivos finales más alejados no pueden realizar ningún cambio en la tasa de datos, mientras que los dispositivos más cercanos pueden alcanzar SF7. Este comportamiento se puede ver claramente en la figura 4.5 para el enlace ascendente.

En cuanto al mapa resultante para la propuesta de utilizar ADR también en la etapa de enlace descendente, la figura 4.6 muestra que más de la mitad de los ED pueden operar en SF7 y SF8, en lugar del SF9 predefinido por la recomendación del estándar.

A continuación, bajo el mismo escenario, las pruebas comparan los resultados con y sin ADR habilitado, para comprobar el impacto en varias métricas, como el PDR y el consumo de energía.

El PDR alcanzado para el contador de muestras de SNR simulado muestra que la reducción del número de muestras necesarias para que el mecanismo ADR comience a cambiar el SF en los ED no afecta al PDR en este escenario. Esto permite suponer que, en las condiciones estudiadas, es mejor reaccionar más rápido y adaptarse a las condiciones del canal para que los ED alcancen más rápidamente la SF óptima. Sin embargo, hay un aumento en el PDR cuando se envían menos mensajes (como en la periodicidad de carga = 1800 segundos), que se puede ver en todas las configuraciones.

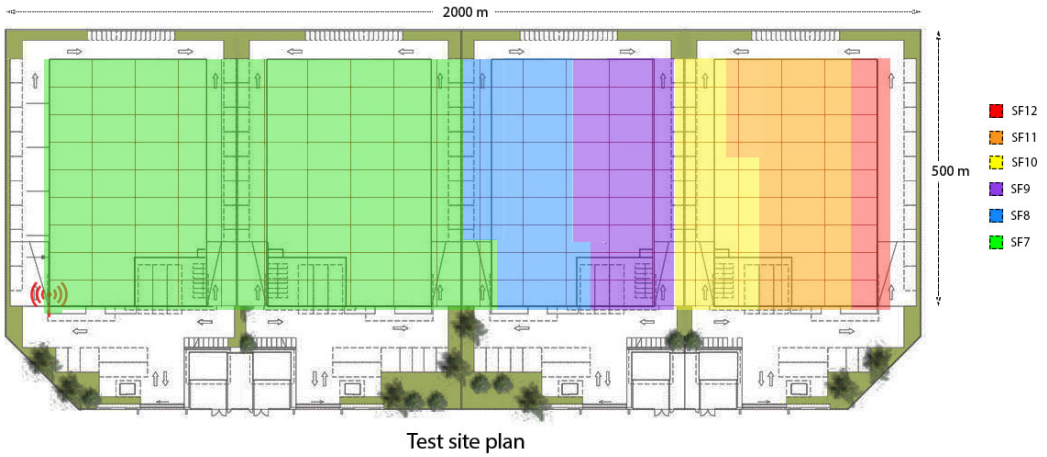


Figura 4.5: Mapa de calor SF para uplink (clase A)



Figura 4.6: Mapa de calor SF para downlink (clase B)

Tabla 4.4: Tiempo hasta SF optimo en función de las muestras y periodo de mensajes

Periodo de mensajes	SNR_{sc}	Tiempo hasta SF optimo
300 s	5	45m
	10	1h10m
	20	2h
900 s	5	2h15m
	10	3h30m
	20	7h
1800 s	5	4h30m
	10	7h
	20	12h

Esta mejora en los resultados de PDR para una mayor periodicidad de carga es esperada, ya que el protocolo MAC de LoRaWAN es similar al Aloha puro en términos de rendimiento de escalabilidad, lo que significa que el rendimiento se degrada cuando aumenta la carga en el enlace.

Por otro lado, la configuración de la red con la SF más baja sin ningún mecanismo ADR logra resultados generales similares, con una diferencia de menos del 0,5% entre SF7 y ADR. Sin embargo, existen áreas donde el uso de ADR muestra la ventaja de usar diferentes SF para evitar colisiones. Esto se refleja en la tabla 4.3, ya que las estadísticas para la simulación sin ADR habilitado se calculan para el almacén más cercano, que es el área más crítica. Esto se debe a que los dispositivos más cercanos a la puerta de enlace sufren más interferencias, ya que hay más paquetes de otros dispositivos que utilizan el canal. Con una SF fija, todos los nodos pueden interferir entre sí, mientras que habilitar el ADR significa que los nodos en diferentes regiones no interfieren, ya que la puerta de enlace puede recuperar paquetes independientemente de todos los SF. Esto se traduce en una diferencia de 1,5 a 1,8% en PDR entre SF7 fijo y ADR (dependiendo de la periodicidad de carga). Para SF12 fijo, los resultados son peores en todas las configuraciones, ya que combina todos los ED que interfieren en la

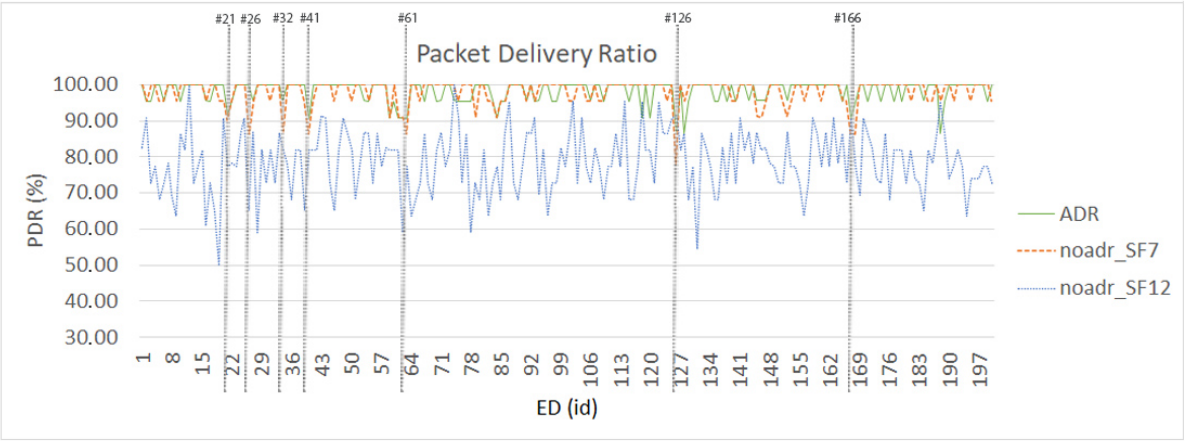


Figura 4.7: PDR

misma SF con los valores de tiempo en el aire más largos, lo que hace que las colisiones sean más probables.

En la figura 4.7 se puede observar el PDR para cada ED en el escenario, y se puede ver que los dispositivos en el primer almacén, y también los que están cerca de las paredes en el resto del escenario, muestran los peores valores de PDR. Esto se debe a la combinación de paredes y a que la distancia entre nodos en el eje vertical es la mitad de la distancia entre nodos en el eje horizontal.

Desde el punto de vista del tráfico de enlace descendente, el uso del mecanismo ADR descrito no afecta al PDR, ya que los ED logran más del 99% de recepciones exitosas. Esto se debe principalmente al uso del modo de operación de clase B, donde los dispositivos tienen una ranura de tiempo asignada y programada, por lo que la probabilidad de éxito ya está maximizada. Por lo tanto, este mecanismo puede ser solo interesante desde el punto de vista del consumo de energía en este escenario. Sin embargo, incluso los escenarios más ruidosos o variables pueden aprovechar la adaptación de la SF hacia arriba y hacia abajo para paliar las pérdidas y optimizar el PDR.

Si bien estos resultados pueden tentar a descartar el uso de ADR, se debe tener en cuenta que la diferencia entre usarlo y no usarlo aumenta con la distancia entre el ED y la puerta de enlace. Dado que el mecanismo ADR ha sido validado en unas condiciones realistas, se puede asumir que en diferentes escenarios con diferentes condiciones, especialmente con aún mayores niveles de ruido o de distancias más largas, los beneficios del ADR sean diferenciales.

Estos resultados tienen un serio impacto en el consumo de energía de los dispositivos. La ecuación 4.8, donde I_{tx} es el consumo de corriente durante la transmisión y V es el voltaje fijado en 5V, se utiliza para calcular la energía utilizada para la transmisión en 24h según la SF alcanzada gracias al ADR. Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran que, al elegir un C_x más bajo, se alcanzan SF más bajas más rápido y, por lo tanto, los ED dedican menos tiempo a la transmisión, lo que se traduce en un menor consumo de energía. La configuración del mecanismo ADR para usar solo 5 muestras como C_x reduce el consumo de energía de la red a la mitad en comparación con el valor comúnmente usado de 20 muestras.

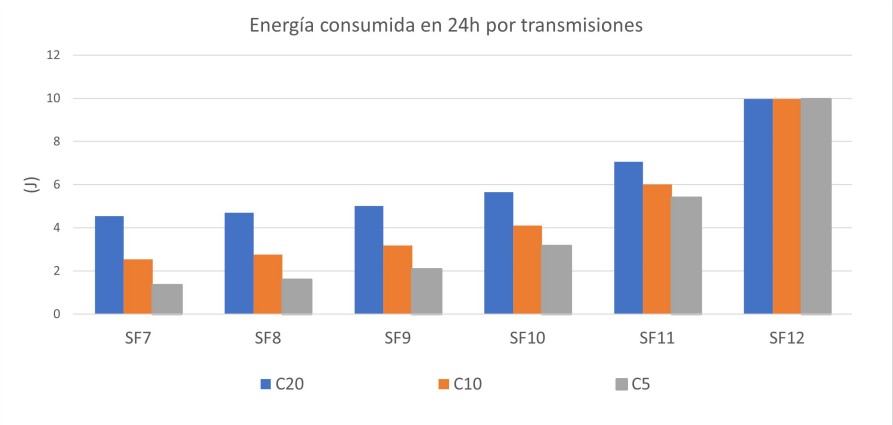


Figura 4.8: Energía consumida por nodo tras 24h según el SF utilizado en fase uplink

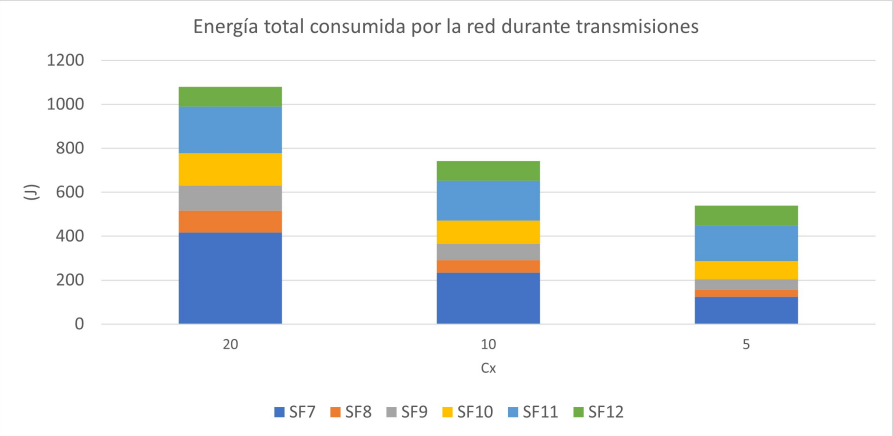


Figura 4.9: Energía total consumida en 24h por la red en fase uplink

$$E_{tx_consum} = \sum_{SF_i=7}^{SF_i=12} I_{tx} \cdot V \cdot T_{airtime_SF_i} \cdot \frac{T_{in_SF_i}}{T_{tx}} \tag{4.8}$$

En cuanto a la etapa de enlace descendente, cuando los nodos reciben paquetes, la sobrecarga de energía de la operación de Clase B es función de:

- El tiempo de emisión de la baliza, que es específico de la región (SF9/125kHz) => tiempo de emisión de la baliza 160mSec.
- La periodicidad de los pingslots (2 ranuras de ping por período de baliza en este caso).
- La SF de el pingslot.
- La periodicidad del enlace descendente de Clase B.

Teniendo esto en cuenta, el principal consumidor de energía para un ED es la recepción de balizas y el tiempo mínimo que debe estar escuchando durante sus ranuras de ping asignadas, incluso si no hay paquetes entrantes. Este consumo es fijo y el mismo para todos los nodos, por lo que no se agrega al cálculo para resaltar el impacto de cambiar la SF durante el enlace descendente, que se puede ver en la figura 4.10, y es similar a la etapa de enlace ascendente.

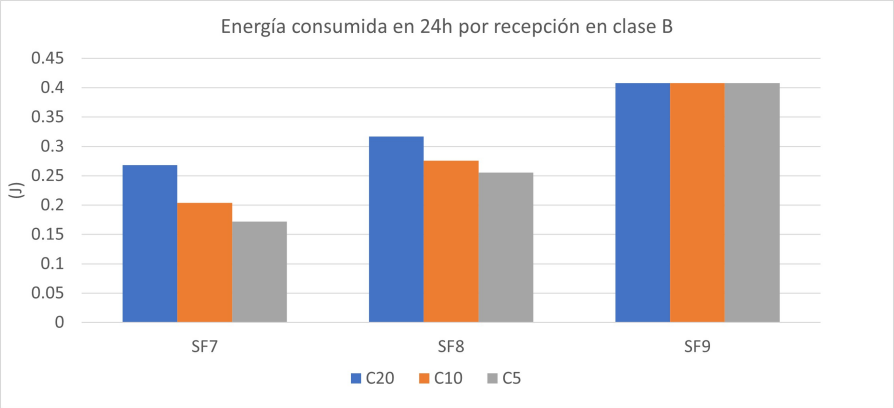


Figura 4.10: Energía consumida por nodo tras 24h según el SF utilizado en fase downlink

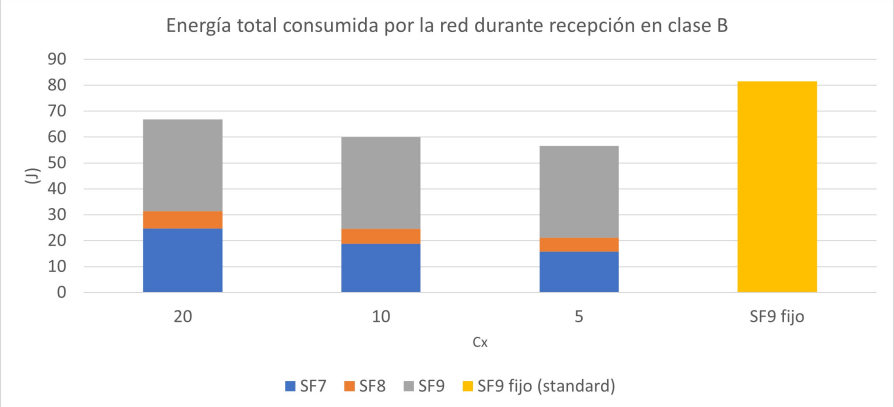


Figura 4.11: Energía total consumida en 24h por la red en fase downlink

En la figura 4.11 se muestra la energía total consumida por los ED en la red al recibir paquetes durante los pingslots de clase B, y allí se puede ver que el impacto de reducir la SF en los dispositivos se traduce en una considerable reducción del consumo de energía.

4.3 Mecanismo DROB: Data Rate Optimization for class B

DROB introduce mejoras significativas respecto al algoritmo ADR de enlace descendente basado en el estándar, especialmente en su capacidad de adaptación a las condiciones cambiantes del canal y la robustez de la comunicación. Estas mejoras se basan en la monitorización del Packet Loss Ratio o PLR, mediante una ventana deslizante y la adaptación dinámica del DR en consecuencia.

El algoritmo DROB utiliza una ventana deslizante para calcular el PLR de cada nodo. Esta ventana almacena un número determinado de transmisiones de enlace descendente recientes para cada nodo y calcula la proporción de paquetes perdidos dentro de esa ventana. El tamaño de la ventana es un parámetro configurable que permite ajustar la sensibilidad del algoritmo a los cambios en el PLR.

Como punto de partida y por comparación con el mecanismo de ADR descrito en secciones anteriores, se denominará al tamaño de ventana también como C_x. El funcionamiento de la ventana deslizante se define como solapada (stride=1), para agilizar la respuesta a cambios en la red y reducir el tiempo de convergencia al DR óptimo respecto al ADR de la sección 4.2. La figura 4.12 muestra el funcionamiento de dicha ventana deslizante.

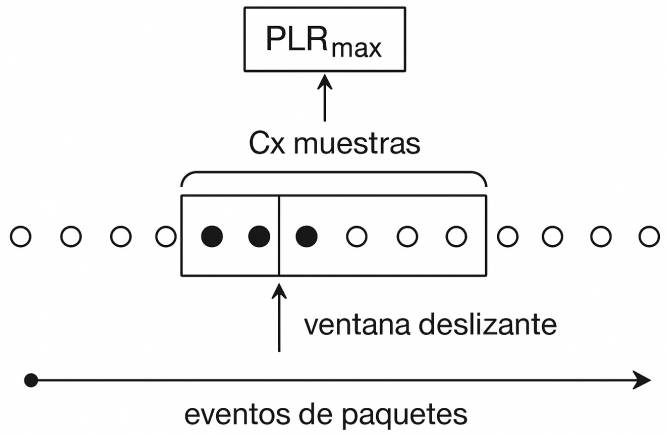


Figura 4.12: Ventana Deslizante sin solape

Cuando el PLR de un nodo supera el límite predefinido (PLR_{max}), el algoritmo DROB disminuye el DR utilizada para las transmisiones de enlace descendente a ese nodo. Esto permite aumentar la robustez de la comunicación y reducir la probabilidad de pérdida de paquetes en condiciones de canal adversas. Por otro lado, si el PLR se mantiene por debajo del límite durante un cierto período, el algoritmo puede aumentar el DR para optimizar el tiempo en el aire y el consumo de energía.

Esta propuesta también considera algunos puntos clave, derivados de las limitaciones del gateway:

- La tasa de datos máxima (DR) que puede usar el gateway se establece en DR3. Tasas mayores afectarían la sincronización estricta de los pingslots, lo que obliga a modificar parámetros de temporización que podrían interrumpir la comunicación.

- Los incrementos de potencia antes de cambiar la tasa de datos no se consideran, ya que el gateway no tiene limitaciones de batería y siempre opera a la máxima permitida para alcanzar la mayor distancia y múltiples destinos. Esto difiere de un nodo, que solo necesita ajustar su potencia para llegar al gateway y suele funcionar con limitaciones de batería.

El funcionamiento del DROB (véase figura 4.13, o en otro formato en el pseudocódigo 4.14) puede describirse mediante los siguientes pasos:

1. Recopilación de estadísticas: El gateway calcula las mismas estadísticas para cada nodo.

2. Envío de datos por el nodo: Los nodos necesitan enviar información al gateway durante la transmisión ascendente, como el SNR recibida y el reconocimiento de el pingslot, para que el DROB pueda funcionar. Esta información se puede enviar como datos adicionales en mensajes de enlace ascendente regulares o en reconocimientos de enlace descendente, lo que ocurra primero.

3. Cálculo de la tasa de datos óptima: Cuando se alcanza el pingslot asignada a un nodo específico, el gateway utiliza la tasa de datos calculada para enviar el paquete descendente.

4. Seguimiento de pérdida de paquetes: El gateway también rastrea la tasa de pérdida de paquetes (PLR) para cada nodo, es decir, la proporción de paquetes perdidos en el enlace descendente, actualizando este valor periódicamente mediante un algoritmo de ventana deslizante.

5. Adaptación dinámica de la tasa de datos: Si el PLR supera un límite seleccionado ((PLR_{max})), según los requisitos de la aplicación, el gateway informa al nodo que los siguientes paquetes se enviarán tras reducir la tasa de datos.

Ventajas del DROB frente al ADR tradicional:

- **Mayor adaptabilidad:** La monitorización continua de el PLR y la adaptación dinámica de el DR permiten al algoritmo DROB responder de forma más rápida y precisa a los cambios en las condiciones del canal.

- **Mayor robustez:** La reducción de el DR en caso de pérdidas de paquetes aumenta la resistencia a interferencias y mejora la fiabilidad de la comunicación, especialmente en entornos industriales con ruido variable.

- **Equilibrio entre PDR y consumo de energía:** El algoritmo DROB busca un equilibrio entre maximizar el PDR y minimizar consumo de energía, ajustando el DR en función de las condiciones del canal.

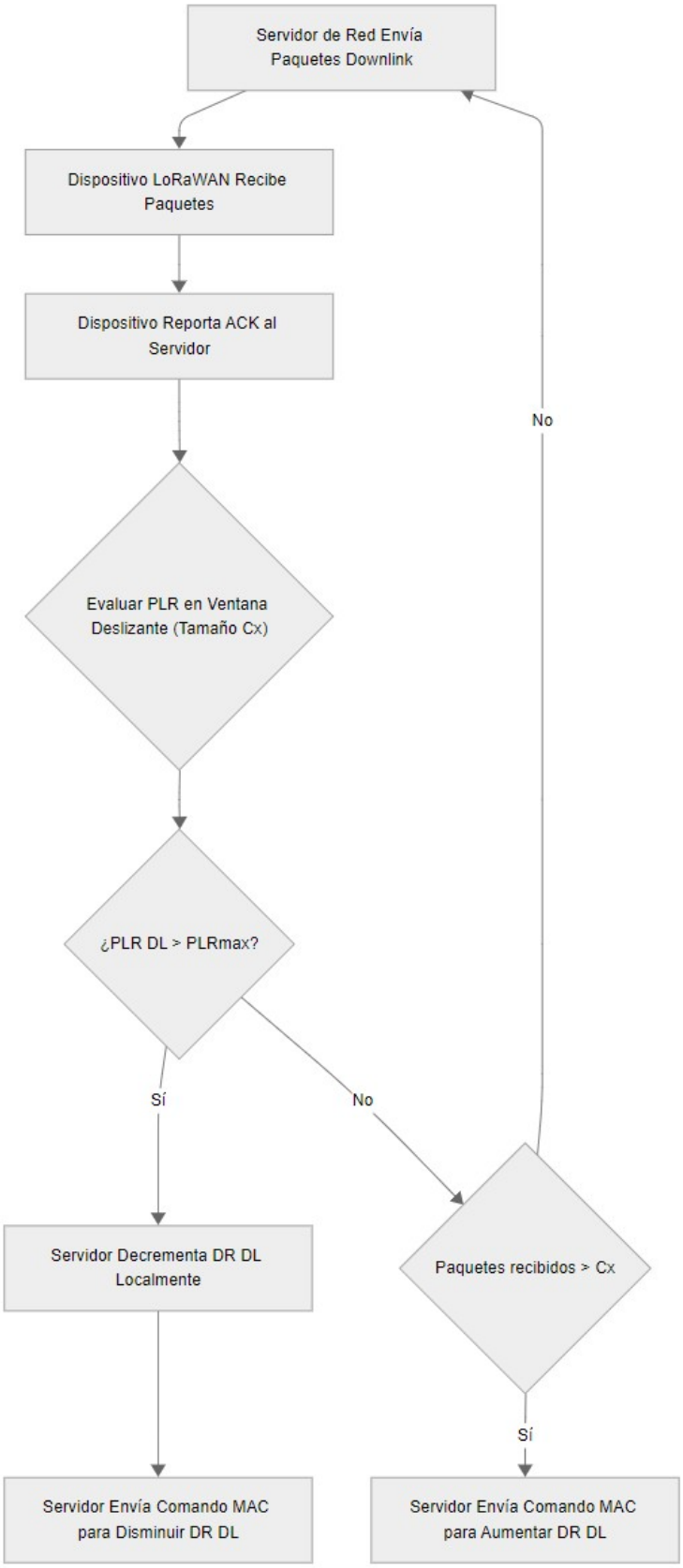


Figura 4.13: Algoritmo del mecanismo DROB

```
// --- Definicion de Constantes y Variables ---
CONSTANTE Cx
CONSTANTE PLRmax

VARIABLE VentanaPaquetes: LISTA
VARIABLE DRDL: ENTERO

// --- Procedimiento principal ---
PROCEDIMIENTO EvaluarConexionDownlink(estadoDelPaquete)

  Anadir(VentanaPaquetes, estadoDelPaquete)
  SI Longitud(VentanaPaquetes) > Cx ENTONCES
    Eliminar_Primer_Elemento(VentanaPaquetes)
  FIN SI

  paquetesPerdidos = Contar_Paquetes_Perdidos(VentanaPaquetes)
  totalVentana = Longitud(VentanaPaquetes)
  PLRDL = paquetesPerdidos / totalVentana

  SI (PLRDL > PLRmax) ENTONCES
    DRDL = DRDL - 1
    EnviarComandoMAC(dispositivo, "Disminuir_DR_DL")
  SINO
    paquetesRecibidos = totalVentana - paquetesPerdidos
    SI (paquetesRecibidos >= Cx) ENTONCES
      EnviarComandoMAC(dispositivo, "Aumentar_DR_DL")
    FIN SI
  FIN SI
FIN PROCEDIMIENTO
```

Figura 4.14: Pseudocódigo del mecanismo DROB

4.3.1 Resultados para DROB

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones llevadas a cabo para la validación del mecanismo propuesto.

En la figura 4.15 se muestran las simulaciones de 24 horas de la red. En este caso, las configuraciones sin fuentes de interferencia externas muestran poca o ninguna pérdida de paquetes durante el enlace descendente, lo que concuerda con los resultados teóricos para la operación de clase B en LoRaWAN. Como los resultados muestran un 0% de pérdida de paquetes, ese caso no se muestra en la figura. Sin embargo, al activar las fuentes de interferencia, las pérdidas de paquetes aumentan en todos los nodos de la red. Estas pérdidas son mayores cuanto más cerca están los nodos de las fuentes de interferencia. En el caso del escenario saturado, casi todos los paquetes se ven afectados por la interferencia y las pérdidas son muy altas en todas las configuraciones, por lo que no se muestran en la figura. En cuanto al escenario real, es relevante que para la configuración DR3, que se supone es más robusta al ruido que DR5 (el margen SNR soportado es mayor y el tiempo en el aire de los paquetes es más largo, por lo que el receptor tiene más tiempo para recuperar el paquete), el porcentaje de paquetes perdidos es mayor. Esto se debe al mayor tiempo de transmisión necesario para recibir un paquete en DR3. Para las fuentes de interferencia intrared LoRaWAN, generalmente DR3 es más favorable, ya que los paquetes de los otros nodos tardarían menos o el mismo tiempo en transmitirse, y la potencia recibida por el interferente está dentro del margen SNR.

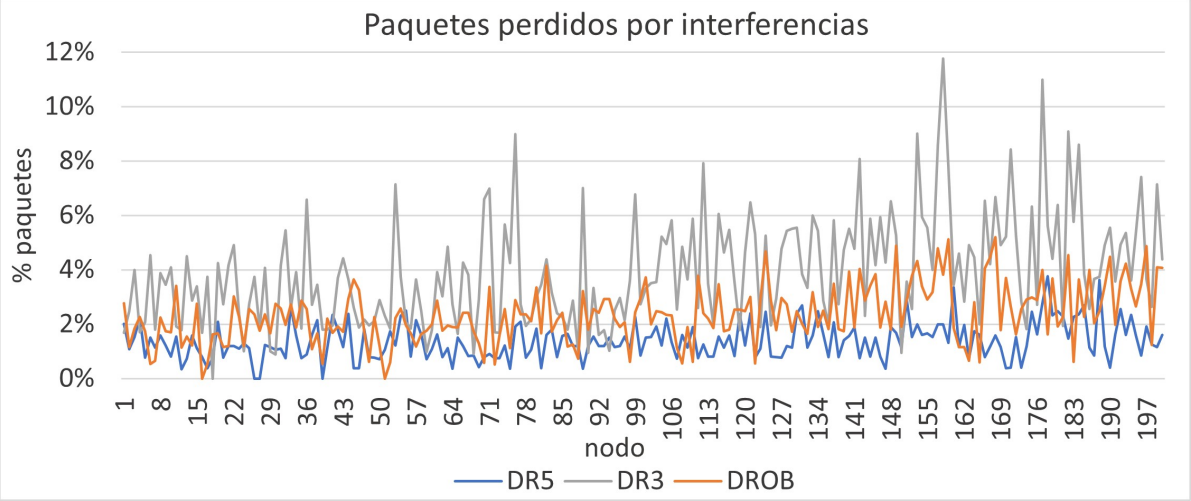


Figura 4.15: Paquetes destruidos por interferencias en 24h

Sin embargo, al incluir fuentes externas que transmiten durante períodos mucho más largos y con mayor potencia, el mayor tiempo en el aire solo aumenta la probabilidad de que la interferencia cause una pérdida de paquetes. Este valor de paquetes perdidos se refiere únicamente al tráfico de enlace descendente, que, como se describió, está programado de tal manera que, en teoría, las únicas fuentes que pueden causar interferencia son las externas introducidas en el escenario. DROB alcanza valores intermedios entre DR3 y DR5. Esto se debe a que los nodos pasan tiempo configurados entre DR3, DR4 y DR5. Por lo tanto, es de esperar que, después de 24 horas, se obtengan estos resultados.

Para evaluar el impacto real de las señales de interferencia en la red, y al mismo tiempo observar el impacto del mecanismo DROB propuesto, se utiliza el PDR para el tráfico de enlace descendente.

	C_{20}	C_{10}	C_5
AVG	85,86%	85,62%	85,60%
MAX	95,26%	94,74%	92,83%
MIN	72,35%	79,44%	71,21%

Tabla 4.5: Resultados de PDR globales de la red para DROB con distintos C_x

El PDR representa la tasa de recepción exitosa de paquetes; por lo tanto, se espera un PDR más bajo con mayores interferencias. Vale la pena señalar que el impacto de la interferencia puede diferir no solo debido a las fuentes de interferencia, sino también a la configuración de los nodos y el gateway. Aquí es donde el mecanismo DROB intenta optimizar los recursos de acuerdo con las variables del entorno.

Dado que el mecanismo DROB es ajustable y el número de muestras (usando la notación C_x para identificar el tamaño de la ventana utilizada, mediante el subíndice x, equivalente al número de muestras de SNR para ADR tradicional) para realizar las operaciones es configurable, la simulación se ha realizado variando este parámetro para seleccionar el valor óptimo y verificar su impacto. Luego, se usó este valor para compararlo con las configuraciones de DR fijas. Se han utilizado valores de 20, 10 y 5 muestras.

Valores superiores a 20 harían que el mecanismo reaccione de forma demasiado lenta, al tener que esperar a obtener suficientes muestras. Por el contrario, valores más bajos significan una reacción más rápida, pero también pueden introducir demasiada variabilidad y causar inestabilidad en la red, ya que la configuración cambia con demasiada frecuencia; por lo tanto, el límite inferior se establece en 5.

En la tabla 4.5 se puede ver que este parámetro no afecta significativamente a los resultados de PDR obtenidos. En cualquier caso, se selecciona C_{20}, ya que muestra mejores resultados generales y mantiene el muestreo en 20, siguiendo las recomendaciones para el ADR del estándar.

Habiendo optimizado la configuración de DROB, se procede a evaluar su impacto en el PDR en comparación con las configuraciones fijas DR3 y DR5. Estas simulaciones mantienen el DR fijo en DR3 y DR5, que son los límites para el enlace descendente cuando se trabaja en clase B, debido a las restricciones en la duración de los pingslots. DR3 y DR5 representan dos extremos en cuanto a la robustez a la interferencia y la tasa de datos, siendo DR3 más robusto pero con menor tasa de datos, y DR5 viceversa.

Luego, se activa DROB, que selecciona dinámicamente el DR utilizado para cada paquete de enlace descendente enviado. DROB monitoriza continuamente las condiciones de la red y ajusta el DR de cada nodo de manera individual, buscando un equilibrio entre la robustez y la eficiencia.

La figura 4.16 y la tabla 4.6 muestran los resultados del PDR tras 24 horas de simulación. Estos resultados muestran que el mecanismo DROB propuesto alcanza resultados más cercanos a la configuración DR5, aunque es capaz de mantener más nodos por encima del 75% de PDR. DR3 y DR5 representan dos extremos en cuanto a la robustez a la interferencia y la tasa de datos, siendo DR3 más robusto pero con menor tasa de datos, y DR5 viceversa.

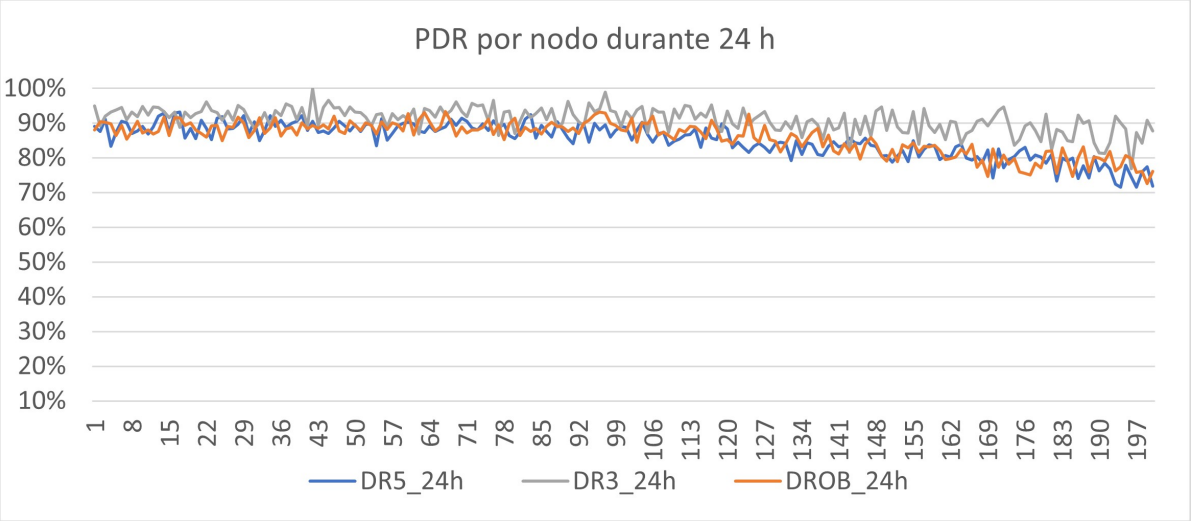


Figura 4.16: PDR en cada dispositivo de la red durante 24h de simulación

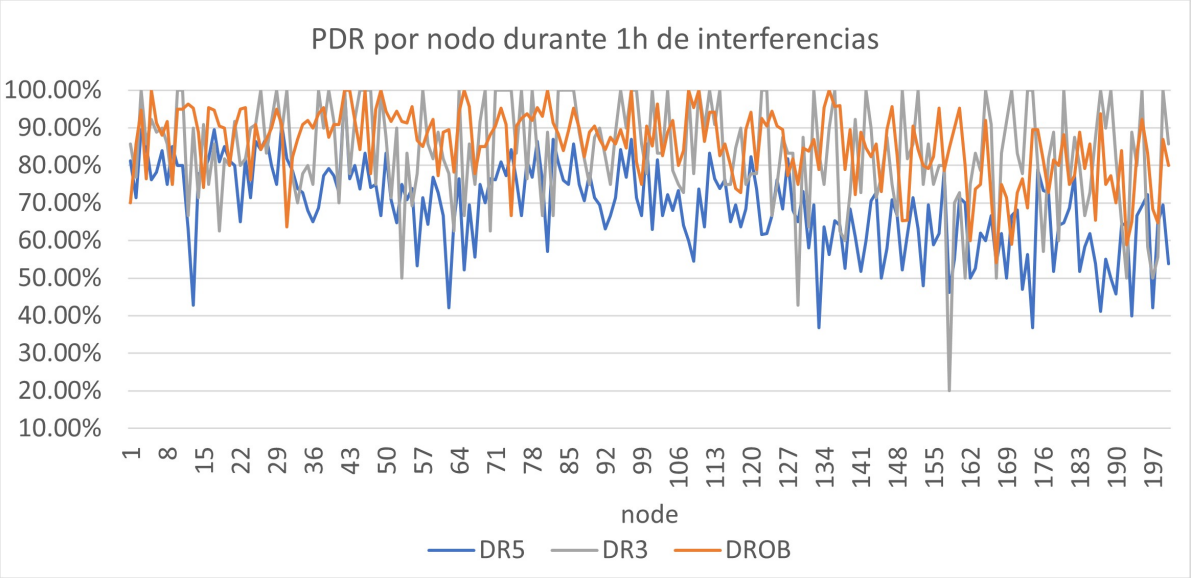


Figura 4.17: PDR en cada dispositivo de la red en detalle de un periodo de 1h con altos niveles de ruido

Si el análisis se centra en los períodos de 1 hora que introducen interferencias con más frecuencia (véase figura 4.17), los resultados para el mecanismo DROB muestran una mejora frente a las otras configuraciones. Esto se debe a que DROB se adapta a las condiciones del canal en los nodos que sufren pérdida de paquetes, manteniendo el DR lo más alto posible en el resto.

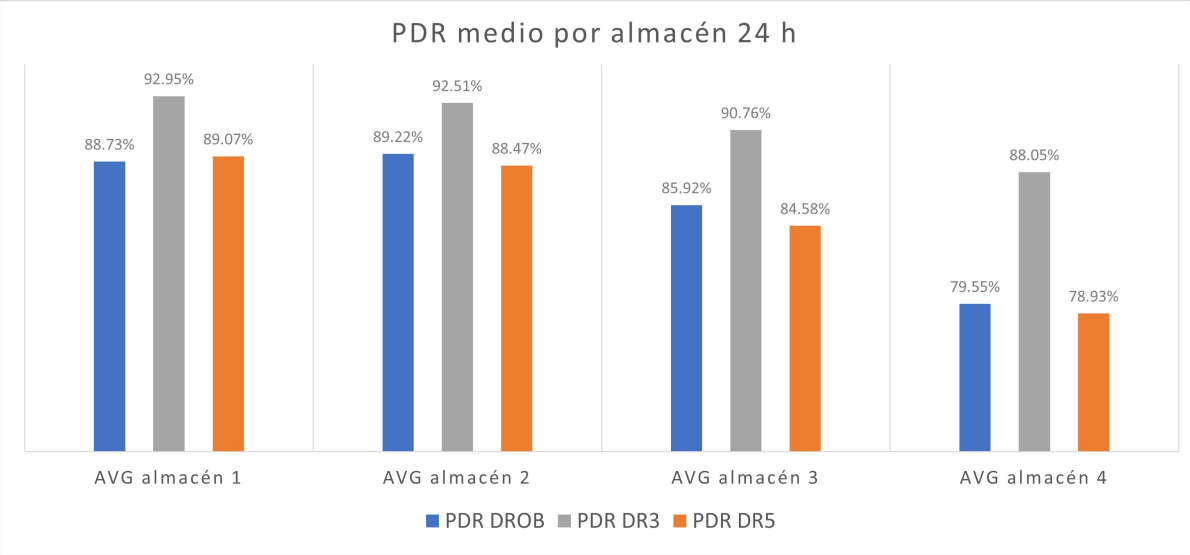


Figura 4.18: Comparación de PDR medio para cada almacén del escenario con o sin DROB activado en 24h

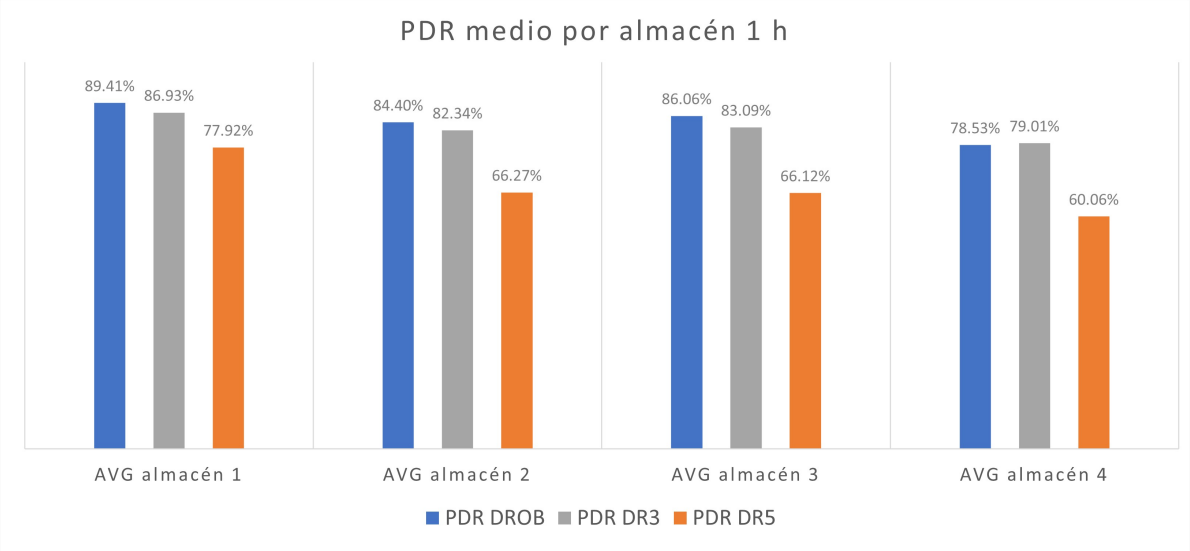


Figura 4.19: Comparación de PDR medio para cada almacén del escenario con o sin DROB activado durante 1h de interferencias

Al elegir la mejor configuración de DR considerando los cambios del canal a lo largo del tiempo, nodo por nodo, el resultado es que, durante los períodos de tiempo en que el ruido es más frecuente, DROB logra mejores resultados de PDR que las configuraciones más rápidas (DR5) e incluso la más robusta (DR3).

También es capaz de enviar más paquetes que DR3 y mantener más nodos por encima del 75% de PDR que las otras configuraciones. La tabla 4.6 muestra los resultados generales y parciales para toda la red. Además, la figura 4.18 muestra el PDR promedio de 24h por zona o almacén (50 nodos), donde se puede ver que los nodos más alejados sufren más ruido e interferencias y, por lo tanto, se benefician más del mecanismo DROB.

	DR5 24h	DR3 24h	DROB 24h	DR5 1h	DR3 1h	DROB 1h
PDR AVG	85.26%	91,07%	85,86%	69,14%	83,71%	85,72%
PDR MIN	71,54%	76,85%	72,35%	36,84%	20,00%	54,17%
Entregados	43806	19387	30913	2968	1483	2704
Nodos PDR $< 75\%$	9	0	3	129	37	25
Nodos PDR $< 80\%$	28	1	25	162	70	48

Tabla 4.6: Resultados de PDR globales de la red para configuraciones DROB y DR fijo

De nuevo, se observa en la figura 4.19 que DROB obtiene mejores resultados que con DR fijos en los periodos donde aparecen más interferencias.

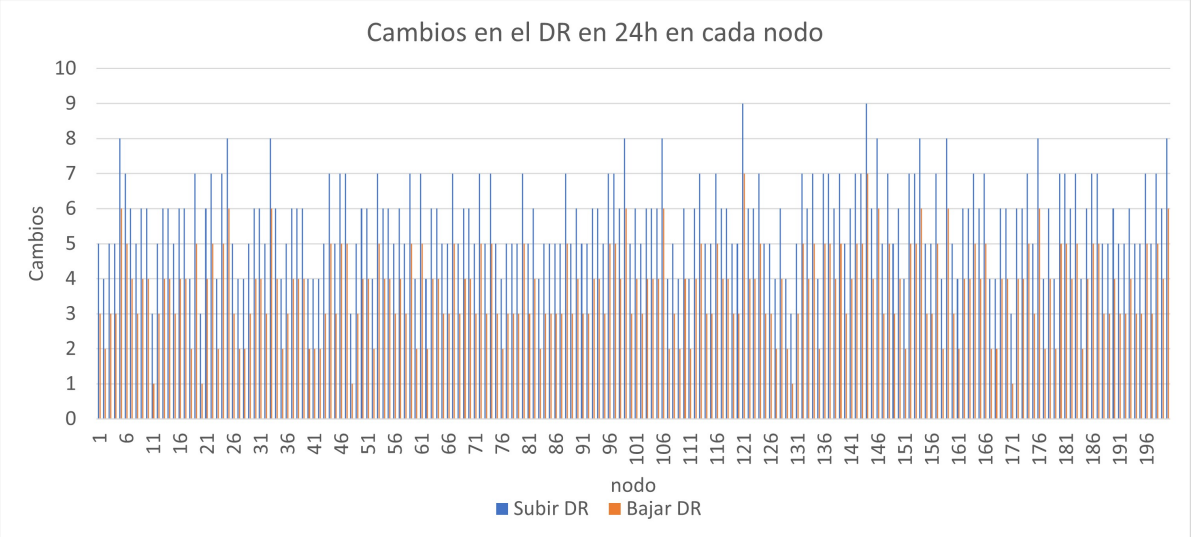


Figura 4.20: Cantidad de cambios de DR para downlink en cada dispositivo en 24h

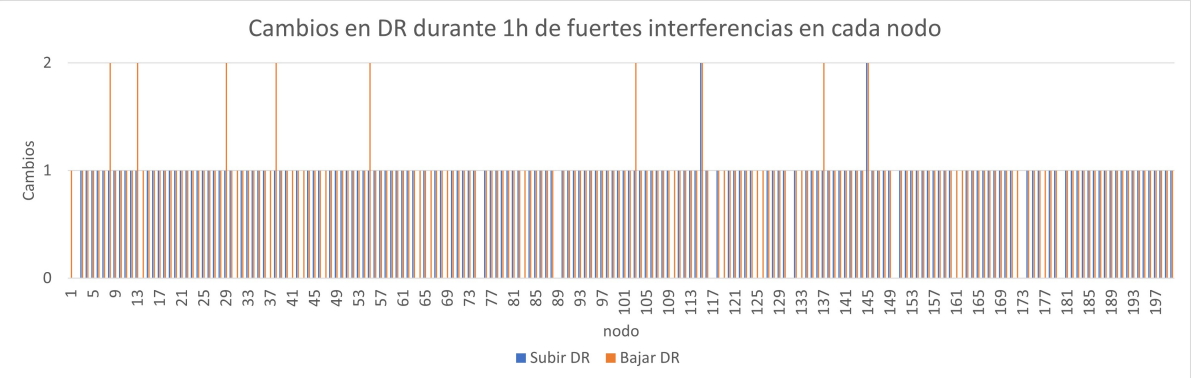


Figura 4.21: Cantidad de cambios de DR para downlink en cada dispositivo para 1h de interferencias

Los cambios de configuración en el DR para cada nodo se resumen en la figura 4.20, donde se puede ver el número de aumentos y disminuciones del DR (ambos representan un cambio en el DR) para cada nodo durante esa simulación de 24 horas. También, en la figura 4.21, con los cambios de DR durante un intervalo de 1 hora en la simulación que introduce interferencias con más frecuencia, se muestra que el mecanismo DROB reduce el DR durante ese tiempo para adaptarse a las condiciones del canal.

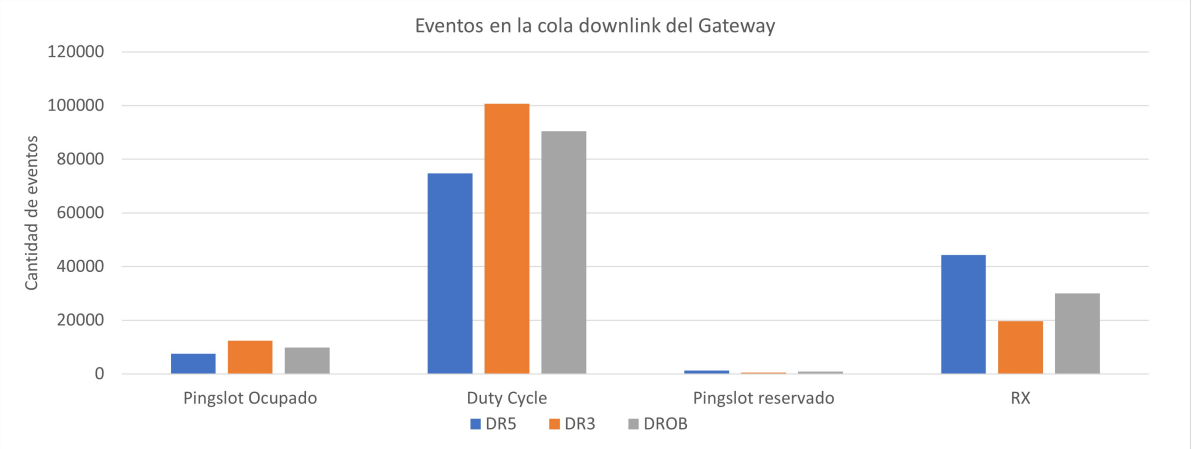


Figura 4.22: Eventos registrados en la cola del GW, afectados por el funcionamiento de clase B y por el DR usado

Es durante esos períodos que los mecanismos activan las operaciones de reducción de DR, mientras que en otros períodos, si es posible, activan las operaciones de aumento de DR.

Al analizar los resultados de los paquetes enviados por la puerta de enlace, queda claro que existe una gran diferencia según el DR utilizada. Esto se debe al efecto de tener tiempos en el aire más largos o más cortos necesarios para transmitir un paquete.

El impacto del tiempo en el aire es mayor en la etapa de enlace descendente, ya que la puerta de enlace necesita transmitir a muchos nodos en períodos cortos de tiempo, por lo que encuentra fuertes limitaciones debido al ciclo de trabajo.

Sin embargo, también pueden ocurrir otros eventos en el búfer de salida de la puerta de enlace cuando opera en clase B, como que encuentre el canal ocupado por un uplink o que el slot escogido ya estuviera asignado a otro nodo. El impacto sobre el búfer del GW y los eventos posibles se observa en la figura 4.22. Esto incluye encontrar el pingslot programado todavía ocupado (nuevamente, debido a tiempos en el aire más largos), o incluso nodos que tienen la misma ranura asignada (lo que puede suceder cuando el número de nodos es mayor que las ranuras disponibles).

El mecanismo propuesto se puede refinar aún más para adaptarse de manera diferente a los cambios de canal, pero con los resultados de este escenario se valida para funcionar bajo un cierto conjunto de parámetros que intentan estresar el sistema y forzar el cambio de DR con más frecuencia, por lo que se puede esperar que reaccione en consecuencia a otros escenarios y aplicaciones donde sus beneficios pueden ser aún mayores.

El objetivo principal es proporcionar una herramienta que permita cierto grado de adaptabilidad a las condiciones variables de la red sin conocimiento a priori ni planificación previa.

Cambiar el DR (o SF) utilizado durante la comunicación es uno de los parámetros que más impactan en el consumo de energía en una red LoRaWAN, porque se traduce directamente en el tiempo que el nodo debe estar con la interfaz de radio encendida (ya sea para transmisión o para recepción). Para este análisis, solo se considera la etapa de enlace descendente (cómo calcular la etapa uplink se puede ver en la ecuación 4.8), y la atención se centra en los nodos, ya que se supone que la puerta de enlace tiene alimentación principal.

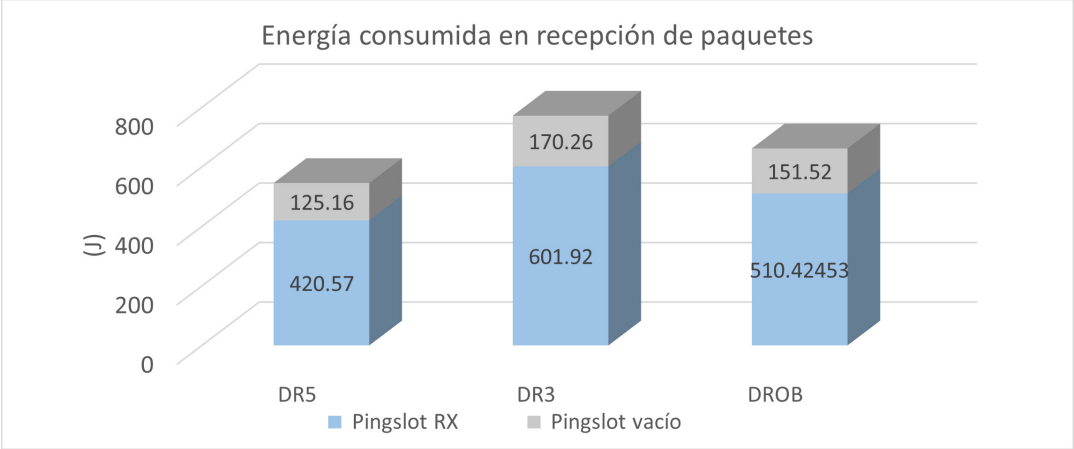


Figura 4.23: Energía total consumida durante downlink con DROB o DR fijo

Cuando los nodos reciben paquetes, la sobrecarga de energía de la operación de Clase B es una función de:

- El tiempo de emisión de la baliza, que es específico de la región (SF9 / 125kHz).
- La periodicidad de los pingslots (1 ranura de ping por período de baliza en este caso).
- El DR de el pingslot, que permite calcular el tiempo de emisión del paquete.
- Si durante el pingslot asignada se está enviando o no un paquete.

Dejando a un lado las balizas, que son constantes para todos los nodos, para cada dispositivo en la red durante la recepción en clase B, la energía consumida E_{RX} se puede calcular con la ecuación 4.9, donde:

$$E_{RX} = \sum_{DR_i=3}^{DR_i=5} I_{RX} \cdot V \cdot \left(t_{airtime_{DR_i}} \cdot N_{DR_i} + t_{preamble} \cdot N_{empty_{slots}}\right) \tag{4.9}$$

- I_{RX} es el consumo de corriente y V es el voltaje.
- $t_{airtimeDRi}$ es el tiempo de emisión del paquete para el DR utilizada.
- N_{DRi} es el número de paquetes recibidos con esa DR.
- $t_{preamble}$ es el tiempo que la radio está encendida escuchando para detectar si hay un paquete entrante o no.
- $N_{emptyslots}$ es el número de ranuras de ping cuando el nodo no detectó paquetes entrantes.

Como era de esperar, la figura 4.23 muestra cómo DR5, debido al tiempo de emisión reducido requerido, logra los mejores resultados, incluso después de enviar más mensajes, con DROB equilibrado entre configuraciones. Como se explicó anteriormente, esto también significa que si las condiciones del canal o del escenario llegaran al punto en que algunos nodos en DR5 no pudieran recibir, DROB seguiría funcionando, reduciendo el DR pero manteniéndolo lo más alta posible; por lo tanto, consumiendo menos que DR3 fijo, con los mismos niveles de robustez.

4.4 Conclusiones

El mecanismo descrito en este capítulo ofrece resultados de interés, ya que aborda casos en los que las condiciones del canal pueden cambiar con frecuencia e impactar enormemente en el funcionamiento de la red.

Un análisis superficial de los resultados podría sugerir dos opciones óptimas: seleccionar un DR5 fijo, que permite enviar más paquetes y utiliza menos energía, o seleccionar DR3 para asegurar los mejores resultados de PDR, a costa de enviar menos mensajes debido a las restricciones del ciclo de trabajo. Un comentario relevante aquí es que la configuración probada se selecciona para que sea muy desafiante para la operación en clase B, ya que el gateway intenta enviar un paquete por nodo por ciclo de baliza (128 s), y esta es la causa de la cantidad de eventos de descarte de paquetes en el búfer del gateway. En cualquier caso, es una buena prueba de posibles situaciones con tráfico irregular, cuando el gateway necesita enviar grandes cantidades de datos (actualizaciones de firmware OTA, configuraciones, etc.).

Pero el objetivo principal del mecanismo propuesto es adaptarse a las condiciones variables, lo que significa que funciona con el DR más alto, cuando es posible, pero utiliza DRs más bajos cuando el canal presenta demasiadas interferencias. Por lo tanto, los resultados logrados son los esperados, ya que el rendimiento de DROB se encuentra entre los límites DR5 y DR3. Los resultados en los períodos de interferencias y ruido de alta frecuencia son prometedores. Esto también significa que se puede esperar que DROB muestre más beneficios en otros escenarios, por ejemplo, en áreas con una distribución de nodos más densa o para distancias mayores. Todo depende de las condiciones del escenario y la red desplegada, por lo que es una característica clave que DROB logre resultados estables y adaptables y que pueda utilizarse para diferentes tipos de escenarios. Al utilizar este tipo de mecanismo reactivo y autónomo, se reduce la necesidad de herramientas de preplanificación del despliegue.

Capítulo 5

Optimización de planificaciones para LoRaWAN Clase B

5.1 Introducción

La gran cantidad de tráfico de red derivado de aplicaciones de IoT con implementaciones a gran escala plantea desafíos, ya que los dispositivos luchan por un lugar en el espectro radioeléctrico. Una solución orientada a la inmunidad a las interferencias y el limitado acceso al medio es crucial para superar los problemas de escalabilidad del IoT y lograr un funcionamiento confiable de la red en un espectro saturado.

Las redes IoT con tecnología de radio sub-GHz no interfieren con otros sistemas inalámbricos sobre la banda de 2,4 GHz (como Wi-Fi, Bluetooth), lo que ayuda a mitigar los problemas de jitter y congestión, al tiempo que se benefician de otras características de LPWAN (Low Power Wide Area Networks) como su amplio alcance, bajo consumo de energía y mayor tolerancia al ruido. Muchas tecnologías inalámbricas prometen soportar miles de dispositivos por red, aunque con frecuencia esas cifras solo tienen en cuenta el tráfico ascendente. Sin embargo, tan pronto como sea necesario integrar un número creciente de puntos finales, la complejidad de planificación y configuración de la red puede aumentar rápidamente hasta el punto de ser ingobernable. A medida que cambia el tamaño de la red, un enfoque manual para implementar y operar dispositivos ya no es viable.

Además, los dispositivos a menudo se implementan en ubicaciones remotas o desatendidas que los técnicos rara vez visitan. Para una escalabilidad exitosa del IoT, la administración de la red y los dispositivos debe planificarse desde el principio, y la red debe contar con herramientas y mecanismos para funcionar según sea necesario en una amplia gama de condiciones. Las características como la disponibilidad de datos descendentes (de la nube al dispositivo) tienen un impacto importante en la escalabilidad.

En primer lugar, no existe una solución única para todas las situaciones, ya que a medida que la red cambia, su configuración también debe cambiar. La escalabilidad supone un desafío en todo tipo de red, pero cobra aún más relevancia cuando los recursos son limitados y el

número de dispositivos puede variar enormemente, de decenas a miles. Algunos dispositivos necesitan capacidad para más mensajes que otros, y esto puede ser difícil de planificar con anticipación. Esto conduce a la replanificación y el rediseño, lo que se puede hacer a costa de gastar demasiado tiempo y recursos.

Planificar el mejor escenario y establecer requisitos alcanzables ayudan a reducir el riesgo de no poder cumplir con las expectativas de rendimiento de las redes implementadas y garantizar que la solución proporcionada sea lo suficientemente flexible para cualquier necesidad futura. Por ejemplo, agregar nuevas funciones a los dispositivos IoT implementados puede requerir el intercambio de más mensajes para funcionar correctamente. O el número de dispositivos conectados cambia de arriba a abajo con el tiempo, por lo que una planificación fija es ineficiente o deriva en una falta de conectividad, debido a la pérdida de paquetes y la congestión.

Aunque inicialmente LoRaWAN se usaba principalmente para telemetría y otras aplicaciones centradas en el enlace ascendente, los casos de uso y requisitos centrados en el enlace descendente están aumentando, ya que esta tecnología se está volviendo popular también para la automatización o interfaces de usuario alternativas (como wearables, por ejemplo) para esos escenarios restringidos, como en casos de uso seleccionados en el proyecto europeo ZDMP (Plataforma de fabricación sin defectos) [28].

Esto significa que, en lugar de centrarse únicamente en los dispositivos finales que envían datos a la red a través de una puerta de enlace (GW), ahora los dispositivos finales o nodos (ED en algunas figuras) dispersos en la planta son los que reciben órdenes, instrucciones y actualizaciones de las plataformas de monitorización. Esta estructura de configuración es muy útil para aplicaciones como medidores inteligentes que devuelven información de datos y, en general, para sistemas que heredan una operación de tipo sondeado. Por ejemplo, el uso de la clase B en el campo del telecontrol cuenta con el apoyo de partes relevantes como en, donde un importante proveedor de telecomunicaciones habilitó esta tecnología para diversas aplicaciones como seguimiento de activos, control de balanceo de redes inteligentes, detección de calidad del aire, monitorización remota de pacientes o sistemas de emergencia públicos [29].

Un tema crítico de investigación actual es la escalabilidad de las redes LoRaWAN, especialmente cuando el número de dispositivos finales supera el de puertas de enlace. Este desequilibrio obliga a la puerta de enlace a dividir el tiempo de emisión y los recursos entre todos los dispositivos (uno a muchos), manteniendo la capacidad de escuchar sus transmisiones. Optimizar esta asignación de recursos es fundamental para garantizar el buen funcionamiento de la red.

En las redes LoRaWAN, mecanismos como el ADR o el propuesto anteriormente DROB son fundamentales para optimizar la calidad de la transmisión de los dispositivos finales, ajustando parámetros como el SF o la potencia de transmisión en función de las condiciones del canal. Estos mecanismos se centran en la eficiencia de la transmisión de datos a través del canal escogido. Sin embargo, para abordar los desafíos de escalabilidad y optimización del acceso al medio en despliegues masivos, especialmente en escenarios que involucran dispositivos Clase B, se requieren mecanismos adicionales que complementen al ADR. Aquí es donde técnicas como el ABPC (Adaptive Beacon Period Control) propuesto en este capítulo se vuelven esenciales.

El artículo de [30] se examina cómo el tráfico de enlace descendente impacta en el rendimiento de las redes LoRaWAN. El trabajo de [31] ofrece una visión general de las redes LoRa, incluyendo las problemáticas en la planificación en este tipo de redes y algunas soluciones actuales. En [32] se presenta también un estudio sobre la tecnología LoRaWAN, incluyendo las tendencias recientes para la optimización, las oportunidades, las herramientas de simulación y las direcciones futuras. También en [33] se realiza una revisión sistemática de la literatura

sobre las tramas de enlace descendente en LoRaWAN, útil para comprender cómo abordar el desarrollo de mecanismos de optimización enfocados al downlink.

Siguiendo con los análisis centrados en tráfico descendente, [34] y [35] investigan si el tráfico bidireccional causa más daño que bien en las redes LPWAN basadas en LoRaWAN. En [36] se propone un control de parámetros adaptativo para LoRaWAN que tiene en cuenta la aplicación. El trabajo en [37] analiza cómo mejorar el rendimiento del enlace descendente de LoRaWAN en la banda de frecuencias europea de 868 MHz, ofreciendo algunas ideas relevantes.

En el artículo presentado en [38], se evalúa el uso de LoRaWAN de clase B para la coordinación de sistemas de protección de interfaz distribuidos en redes inteligentes. [39] presenta un banco de pruebas de telemetría LoRaWAN de código abierto para redes inteligentes, y [40] analiza cómo habilitar la comunicación LoRaWAN sobre redes de redes inteligentes Wi-SUN. En otro ejemplo de aplicación, [41] estudia la transmisión de datos en redes de IoT con backscattering para aplicaciones de ciudades inteligentes.

En [42] se revisan las consideraciones de diseño, implementaciones y perspectivas de las redes LoRa con un acceso al medio basado en slots temporales. La escalabilidad de gateways LoRaWAN para la comunicación de clase B en ns-3 se evalúa en [14]. Por otro lado, [43] analiza la eficiencia de LoRaWAN clase B para el tráfico de enlace descendente, mientras que en [44] se propone una mejora en la fiabilidad y escalabilidad de LoRaWAN mediante una planificación sencilla.

La mejora de la escalabilidad del enlace descendente en LoRaWAN es el foco de [45]. Otro análisis del rendimiento y la optimización de la transmisión de enlace descendente en el modo LoRaWAN clase B se presenta en [46] y en [47].

Los desafíos de implementar una planificación en LoRaWAN se analizan en [48], donde se presenta un concepto de sincronización y planificación de baja sobrecarga. TRILO, un protocolo de comunicación de enlace descendente que mejora la eficiencia energética de LoRaWAN mediante un mecanismo basado en balizas, se propone en [49]. Finalmente, [50] analiza el desarrollo de un sistema de lectura automática de contadores y gestión de interrupciones utilizando tecnología LoRaWAN.

Este capítulo propone una solución compuesta por un modelo analítico y un algoritmo para reconfigurar los parámetros de sincronización y programación de la red. Mientras que DROB optimiza la transmisión de datos, el ABPC mejora la gestión del consumo energético, la latencia, la robustez y la capacidad de la red para dar soporte a un gran número de dispositivos Clase B, optimizando los períodos de beacon y ping slot. Por lo tanto, ABPC y DROB se complementan entre sí para proporcionar una solución más completa para la gestión de redes LoRaWAN.

Este enfoque permite a la puerta de enlace adaptarse a cambios en el tamaño de la red o en los requisitos de las aplicaciones, ya sea por un aumento/disminución del número de dispositivos o de la tasa de mensajes. Los resultados de las pruebas proporcionan información valiosa para alimentar algoritmos de toma de decisiones, lo que, una vez validado el modelo, permite mejorar y afinar la respuesta del algoritmo.

5.2 Planificación del acceso al medio en clase B

La comunicación de datos en el modo de clase B se ha introducido en el capítulo 2.2, donde se pueden ver, en la figura 2.8, los parámetros temporales y la estructura de la trama planificada. A continuación, se sigue profundizando en el funcionamiento de la clase B y cómo se realiza el acceso al medio en más detalle.

Cuando expira el intervalo de *beacon reserved*, comienza el intervalo de *beacon window* y cada dispositivo final habilita la recepción radio durante una ranura de tiempo denominado *pingslot*, con un período de pingslot (*ping period*). El *beacon guard* se ajusta a 3 s, para evitar que el gateway siga enviando mensajes de enlace descendente cuando debería enviar balizas.

La *beacon window* se divide en 4096 pingslots con una duración de 30 ms. El número de *pingslots (pingNb)* disponibles durante una *beacon window* se puede derivar del parámetro de periodicidad, al que se hará referencia como k en el resto de la tesis. Está fijado por el estándar como en la ecuación 5.1, por lo tanto, se establece el número de *pingslots* utilizables por un nodo en cada *beacon period* de 1 a 128 *pingslots*:

$$pingNb = 2^{7-k} \quad \text{donde} \quad 0 \leq k \leq 7 \tag{5.1}$$

El *pingPeriod* es el tiempo en reposo entre dos *pingslots*, es constante, y se calcula como en la ecuación 5.2:

$$pingPeriod = \frac{4096}{2^k} \quad \text{slots} \tag{5.2}$$

El desfase entre la baliza y el primer pingslot se elige de forma pseudoaleatoria después de cada baliza para cada dispositivo final, en función del *pingPeriod*, la dirección del dispositivo, las claves privadas del dispositivo y el timestamp de la última baliza recibida:

$$Rand = \text{aes128encrypt}(Key, beaconTime|DevAddr|pad16) \tag{5.3}$$

$$pingOffset = (Rand[0] + Rand[1] \times 256) \mod (pingPeriod) \tag{5.4}$$

Tener un acceso al canal planificado implica que los nodos tienen *pinglsots* específicos asignados, lo que elimina la posibilidad de colisiones con otros nodos, pero también significa que hay un número limitado de *pingslots* disponibles, lo que puede ser un problema a medida que la red crece.

Varios eventos pueden alterar el funcionamiento esperado cuando un Gateway intenta transmitir a nodos de clase B:

- El *pingslot* elegido ya ha sido asignado a otro nodo cuando el número de nodos excede el número de pingslots disponibles, como se muestra en la figura 5.1 en el caso A
- El *pingslot* asignado ya está en uso (debido a que la transmisión downlink anterior se ha alargado por el tamaño del mensaje, o porque hay un mensaje uplink en curso), como se ve en la figura 5.1 en el caso B.

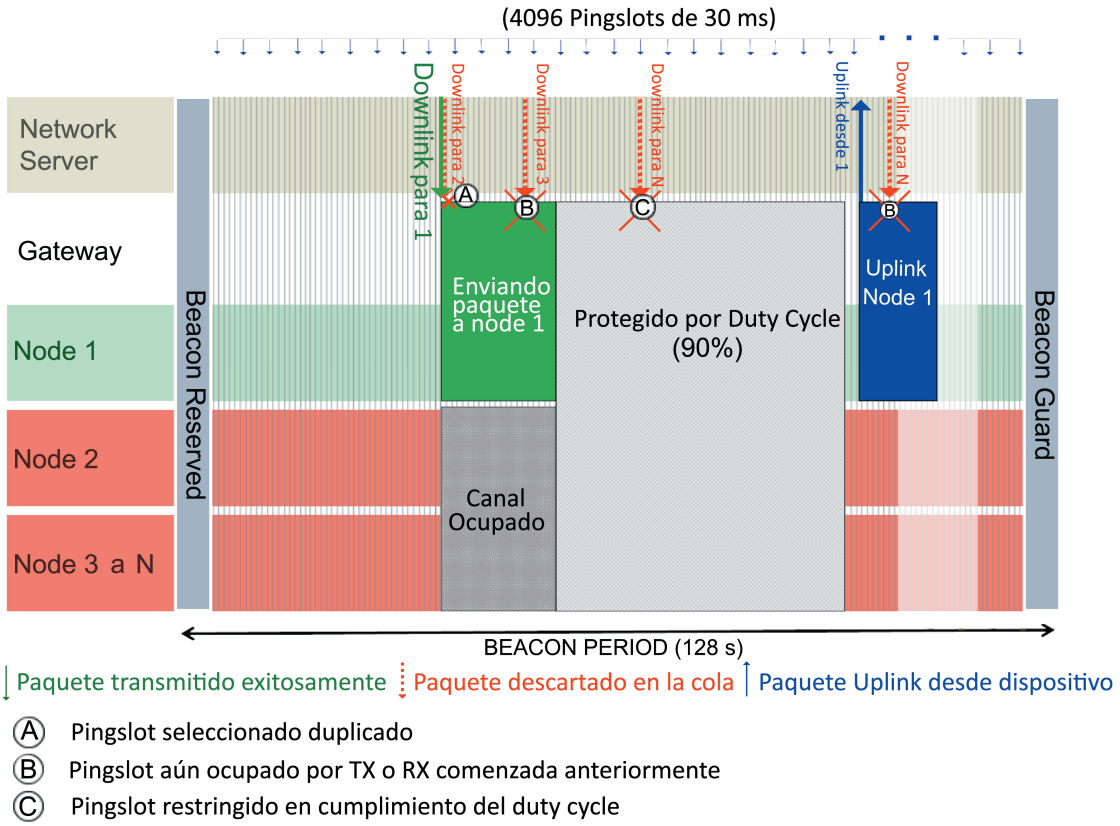


Figura 5.1: Eventos posibles durante la transmisión en un gateway

- El *pingslot* asignado está demasiado cerca del activo anterior (aunque se haya completado) y no se puede utilizar para cumplir con el duty cycle, como se ve en la figura 5.1 caso C.

Hay que considerar que el tiempo que tarda la transmisión de un mensaje depende del tamaño del paquete, lo que se traduce en un *ToA* casi siempre mayor a los 30 ms de un *pingslot*. Tener un *pingslot* asignado solo marca el tiempo de inicio de la transmisión. Esto causa directamente el caso B, y también impacta en el tiempo reservado a causa del duty cycle en el caso C (cuanto más largo sea el mensaje, mayor será el tiempo de espera).

5.3 Modelo analítico para cola de gateway en clase B

Supongamos que se conectan a una puerta de enlace N dispositivos (*ED* o *end device*) en modo Clase B distribuidos uniformemente, según las definiciones de la tabla 5.1. Asumamos también que la puerta de enlace recibe datos para distribuirlos de manera uniforme a cada dispositivo (todos con la misma configuración de *pingNb* y k). Esto significa que la tasa de llegada al sistema, λ, es determinista y puede considerarse ($N \cdot pingPeriod$).

Si suponemos que cualquier paquete que no se atiende durante su ventana de baliza se descarta, entonces el servidor (en este caso, la puerta de enlace o gateway) se representa mediante un sistema con capacidad finita (1 en este caso), ya que los paquetes se descartan si el medio está ocupado. El diagrama del modelo del sistema se muestra en la figura 5.2.

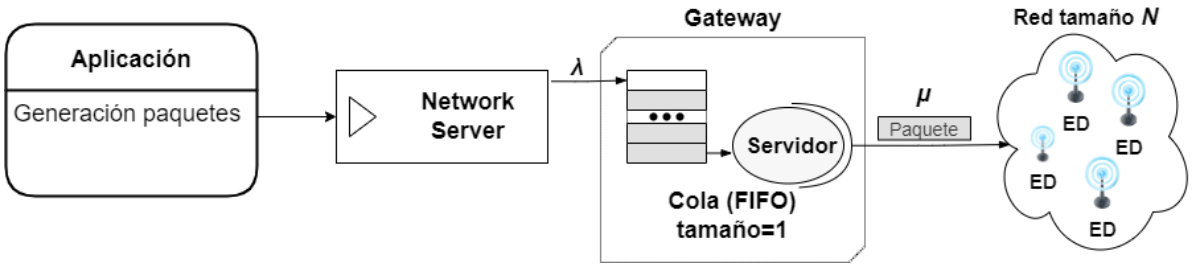


Figura 5.2: Diagrama del sistema modelado

También se supone que los datos de enlace ascendente de los dispositivos, que podrían impedir la transmisión de la puerta de enlace debido a que su radio está ocupado con la recepción, son insignificantes en este caso, ya que la aplicación se centra únicamente en el enlace descendente (enlaces ascendentes esporádicos en el mundo real). Se puede modelar como un sistema D/G/1/2 con una disciplina de cola FIFO.

Los ED están configurados para la recepción con los parámetros predefinidos para el enlace descendente en la clase B, es decir, SF9 y un ancho de banda de 125 kHz, lo que implica un tamaño máximo de paquete de 128 bytes (incluyendo encabezados). Esto es relevante para calcular el tiempo de llegada (ToA) y, por tanto, las limitaciones del ciclo de trabajo, variables que afectan a las ranuras de ping que realmente están disponibles para el enlace descendente en un momento dado. Para la sub-banda g3 seleccionada, el ciclo de trabajo se establece en el 10%, lo que significa que el tiempo requerido entre el inicio de dos tramas consecutivas para cumplir con las regulaciones es 10·ToA (ya que un ciclo de trabajo del 10% implica dejar el canal libre el 90% del tiempo).

Esto significa que, con respecto al tiempo de servicio μ (esto es, la duración que un cliente pasa siendo atendido por el servidor una vez que llega al frente de la cola), es importante tener en cuenta que el paquete que se encuentra al frente de la cola no puede atenderse inmediatamente después de que se complete la transmisión del paquete anterior debido al tiempo de espera introducido por el ciclo de trabajo. Todos los paquetes que llegan cuando el servidor está ocupado se descartan inmediatamente. El resto de las descripciones del modelo y los parámetros utilizados se muestran en la tabla 5.1. Este modelo se utiliza para verificar los resultados del simulador en la sección de resultados.

Si bien el sistema se ha clasificado como D/G/1/2, este tipo de modelo no tiene una solución analítica exacta. Aunque las llegadas deterministas (D) pueden parecer más simples que las llegadas aleatorias (como las que siguen una distribución de Poisson), la regularidad de las llegadas, en lugar de simplificar el modelo, interactúa con la variabilidad de los tiempos de servicio (G) de una manera que dificulta el análisis matemático.

En un sistema con llegadas de Poisson, la aleatoriedad de las llegadas tiende a mitigar la variabilidad en los tiempos de servicio, lo que facilita la obtención de soluciones analíticas. Con llegadas deterministas, este efecto no aparece, y la variabilidad de los tiempos de servicio impacta directamente en el sistema, haciendo que su comportamiento sea más difícil de predecir con fórmulas matemáticas.

Una posible solución para analizar el modelo D/G/1/2 es aproximarlo utilizando un modelo G/G/s. Esto implica reemplazar la distribución de llegada determinista (D) por una distribución general (G), asumiendo que las llegadas también siguen un patrón variable.

Tabla 5.1: Parámetros del modelo

Parámetros	Descripción
k	Periodicidad
N	Número de dispositivos
pingPeriod	Periodo de ping para un k dado
b_w	Duración de la ventana para Bálizas en s
α	Tasa de llegada de mensajes, siguiendo una distribución constante de valor (b_w/N)
ToA	Tiempo en el aire necesario para la recepción de una trama, que depende del SF y del tamaño del paquete
T_{DC}	Tiempo reservado por Duty cycle, valor $9 \cdot$ ToA (para un 10% de duty cycle)
μ	Tasa de servicio, variable de distribución uniforme en $[\text{ToA}, 10 \cdot \text{ToA}]$
s	Número de gateways, en este caso solo 1
p_b	Probabilidad de canal ocupado
ρ	Factor de utilización del sistema $= 1/(s\mu)$
γ	Intensidad del tráfico $= 1/\mu$
P_b	Probabilidad de que el servidor esté ocupado cuando llega un paquete
P_0	Probabilidad de que el gateway esté disponible
L_q	Número de paquetes en cola en el modelo G/G/s
L_{qMMS}	Número de paquetes en cola en el modelo M/M/s

Ventajas de la aproximación:

- Simplifica el análisis al usar un modelo más general.
- Permite el uso de técnicas de análisis para modelos G/G/s.

Desventajas de la aproximación:

- Puede perder precisión al no considerar la naturaleza determinista de las llegadas.
- La precisión de la aproximación depende de la distribución real de las llegadas.

La aproximación G/G/s puede ser aceptable en situaciones donde el proceso de llegada es "casi" determinista, es decir, donde hay una ligera variabilidad en los intervalos de llegada. Sin embargo, si la naturaleza determinista de las llegadas es crucial para el rendimiento del sistema (por ejemplo, si el sistema está diseñado para manejar llegadas en intervalos de tiempo muy precisos, como podría ser en un sistema de polling como el planteado en los siguientes capítulos), esta aproximación no sería apropiada.

Para la aproximación de este modelo, las ecuaciones son las siguientes:

$$L_q = L_{q_{MMS}} \cdot \frac{\mu^2 V(t) + V(t')\lambda^2}{2} \tag{5.5}$$

Donde V(t) es la varianza del tiempo de servicio y V(t') es la varianza del tiempo entre llegadas.

Las demás medidas se calculan igual que en un sistema M/M/s, sabiendo que en este caso *s=1*, por lo que $\gamma = \rho$. Para completar la ecuación 5.5, se necesitan las ecuaciones adicionales del sistema, mostradas en las ecuaciones 5.6, 5.7, 5.8, donde n representa la cantidad de paquetes en el sistema.

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\gamma^n}{n!} + \frac{\gamma^s}{s!(1-\rho)}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{1-\gamma}} \tag{5.6}$$

$$P(n) = \begin{cases} \frac{P(n-1)\gamma}{n} & n \leq 1 \\ P(n-1)\gamma & n > 1 \end{cases} \tag{5.7}$$

$$L_{q_{MMS}} = \frac{P_0 \gamma^s \rho}{s!(1-\rho)^2} = \frac{P_0 \gamma^2}{(1-\gamma)^2} \tag{5.8}$$

Por lo tanto, la probabilidad de encontrar el servidor ocupado (lo que significa que el paquete se descarta) se calcula según la ecuación 5.9:

$$P_b = \sum_{n=1}^{\infty} P(n) \tag{5.9}$$

Otra opción posible es resolverlo mediante métodos de Monte Carlo para eventos discretos [51], una técnica de simulación que utiliza números aleatorios para modelar sistemas complejos. En el contexto de la teoría de colas, estos métodos permiten simular las llegadas, los tiempos de servicio y otros eventos relevantes para obtener una representación del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

Debido a su capacidad para manejar la complejidad del modelo D/G/1/2, se optó por utilizar métodos de Monte Carlo para obtener los resultados. Al simular un gran número de eventos, se puede obtener una estimación precisa de las métricas de rendimiento del sistema, incluso sin una solución analítica exacta. Los pasos para aplicar el método de Monte Carlo son:

1. Generar números aleatorios que representen los tiempos de llegada de los clientes, siguiendo una distribución determinista (D).

2. Generar números aleatorios que representen los tiempos de servicio, siguiendo la distribución general (G) especificada.

3. Simular el funcionamiento del sistema de colas a lo largo del tiempo, registrando eventos como llegadas, inicios de servicio, fin de servicio y rechazos.

4. Repetir la simulación un gran número de veces para obtener una muestra representativa del comportamiento del sistema.

5. Calcular las métricas de rendimiento deseadas (tiempo promedio de espera, longitud de la cola, etc.) a partir de los resultados de las simulaciones.

En cualquier caso, y de igual forma que el G/G/Ds, este método también cuenta con algunas limitaciones a tener en cuenta:

- **Precisión:** La precisión de los resultados depende del número de simulaciones realizadas.

- **Aleatoriedad:** La generación de números aleatorios es fundamental para el método. Si los números no son verdaderamente aleatorios, los resultados pueden estar sesgados.

- **Complejidad:** La implementación de simulaciones puede ser compleja, especialmente para sistemas con muchas variables y eventos.

- **Tiempo de computación:** Las simulaciones pueden requerir un tiempo de computación considerable.

5.4 Diseño y evaluación del mecanismo de tamaño de slot dinámico

El rendimiento del modo Clase B de LoRaWAN se ve influenciado principalmente por la configuración de pingslot, que es fundamental para equilibrar el retraso de transmisión de paquetes de enlace descendente y el consumo de energía.

Con la implementación de la programación de pingslot y período de baliza definida por el estándar, existe un límite en las configuraciones de compensación que se pueden adoptar para abordar diferentes situaciones y requisitos.

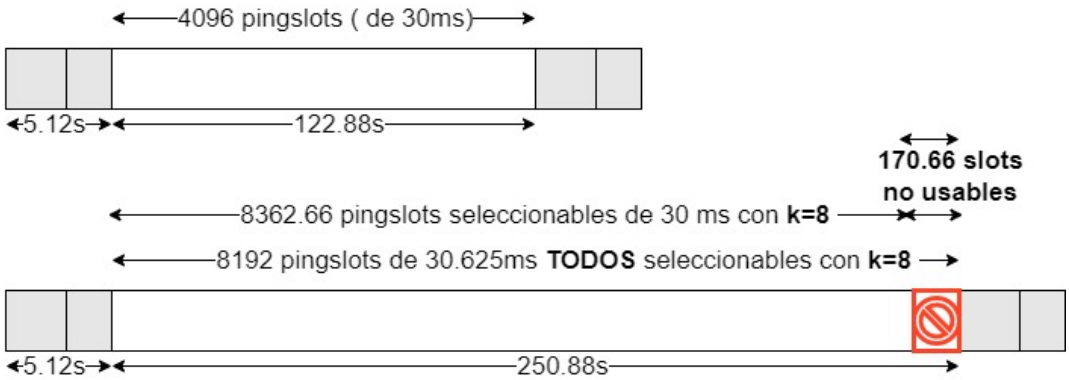


Figura 5.3: Selección de la duración de un pingslot en función de k

Para una red que crece rápidamente con una gran cantidad de nodos que requieren transmisiones de enlace descendente, la intensidad del tráfico puede aumentar lo suficiente como para que el retraso no alcance valores aceptables.

Por el contrario, la cantidad de dispositivos de la red puede disminuir (o ser baja desde el principio). Según las restricciones dadas, puede ser interesante proporcionar un mecanismo que cambie los parámetros de tiempo b_p del período de baliza (y, por lo tanto, también la ventana de baliza b_w) según el tamaño de la red y la carga de tráfico.

Para habilitar diferentes configuraciones de período de baliza de la propuesta del estándar, el parámetro k también debe configurarse en consecuencia, y no solo en el intervalo $0 \leq k \leq 7$. En cuanto a la configuración de los pingslots, la convención adoptada es una duración de 30 ms, que se calcula como el tiempo mínimo necesario para detectar el preámbulo de una trama transmitida, independientemente del SF (y por tanto del ToA de la trama). Por tanto, intentar forzar una duración más corta para un pingslot no es posible, ya que los receptores no detectarían los mensajes entrantes.

Además, la duración de los pingslots se relaciona con otro parámetro clave: el número de pingslots en una ventana de baliza. Como se deduce de la figura 2.8 o la figura 5.3, pingslots de 30 ms en 122,88 s dan como resultado los 4096 pingslots que se pueden utilizar, a priori. Este valor, junto con la periodicidad k, se utiliza para calcular el pingPeriod. Este parámetro también afecta a las ecuaciones del modelo 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9, ya que afecta al tiempo de servicio y las oportunidades de vaciar la cola del gateway, y por tanto a la probabilidad de pérdidas/éxito del sistema.

Por lo tanto, una primera consideración al proponer cambiar el Beacon Period es considerar el efecto de la duración de los pingslots si la duración de la ventana es diferente. Suponiendo que los campos beacon guard y beacon reserved permanezcan fijos (3+2,12 s), ya que están calculados para asegurar la recepción de las balizas transmitidas en cada dispositivo final, si se duplica el Beacon Period, a 256 s en total, eso significaría que el tiempo efectivo bw para los pingslots es 250,88 s, lo que da como resultado 8362,66 slots de 30 ms.

Además, dado que los pingslots direccionables (es decir, los que realmente se usan), que surgen de las ecuaciones 5.1 y 5.2, son potencias de dos, entonces la configuración más cercana sería, con un k=8, tener 8192 pingslots, por lo que se desperdiciarían 170,66 pingslots, lo que reduciría la capacidad teórica para enviar tramas de enlace descendente. Esto se ve mejor en la figura 5.3.

Con base en esta información, y para mantener la duración óptima del pingslot para mantener la capacidad del gateway, el primer paso para implementar un Beacon Period variable

es proporcionar una solución para seleccionar la duración del pingslot de acuerdo con la periodicidad máxima k_{max} disponible y la longitud del Beacon Period:

$$t_{pingslot} = \frac{b_p - b_g - b_r}{2^{k_{max}+5}} \tag{5.10}$$

Donde el valor de k_{max} no es un valor fijo de 7 como propone el estándar y se describe en 5.1 sino que aumenta o disminuye en 1 unidad si el período de Baliza se duplica o se reduce a la mitad, respectivamente. Los parámetros b_p, b_g y b_r se pueden ver en la figura 2.8.

La Tabla 5.2 muestra los valores de tpingslot para diferentes tamaños de Período de Baliza. En consecuencia, pingPeriod ahora no está definido por el pingslot 4096, sino por el número de pingslots disponibles (npingslot) según k_{max}. Entre paréntesis en la columna npingslot se muestra el número de pingslots para una longitud de pingslot fija de 30 ms.

Tabla 5.2: Duración del pingslot según la duración del Beacon Period

Beacon Period	$t_{pingslot}$	$n_{pingslot}$	k_{max}
64 s	57.5 ms (28.75 ms)	1024 (1962.66)	5 (6)
128 s	30 ms	4096	7
256 s	30.625 ms	8192 (8362.66)	8
512 s	31.094 ms	16384 (16896)	9
1024 s	31.095 ms	32768 (43133.33)	10

Nótese que si el Beacon Period cae por debajo de los 128 s indicados en el estándar, $t_{pingslot}$ caería por debajo del mínimo de 30 ms requerido, y por lo tanto k_{max} necesita ser reducido aún más para cumplir. En ese punto, pingslot es casi el doble a 57.5 ms, lo que de hecho es menos eficiente desde el punto de vista energético.

Sin embargo, usar una configuración con tales parámetros solo puede orientarse a aplicaciones con un número muy bajo de dispositivos finales que requieren retardos más cortos, por lo que probablemente el consumo de energía no tenga peso en la decisión.

Por otro lado, valores más altos de Beacon Period no impactan significativamente en la duración del pingslot, pero habilitan más recursos de pingslot para redes con un número creciente de dispositivos finales, siempre que el retardo no sea una preocupación dentro de ciertos límites. Por lo tanto, estos períodos de beacon más largos están orientados a redes grandes sin requisitos estrictos de tiempo, pero pueden beneficiarse del ahorro de energía, ya que pasan menos tiempo escuchando el canal (el número de beacons se reduce a la mitad con cada período que se duplica).

El algoritmo propuesto, denominado Adaptive Beacon Period Configurator (ABPC), configura el tamaño del Beacon Period, la periodicidad k_{max} y el periodo de pingslot $t_{pingslot}$ según la cantidad de dispositivos (o carga de tráfico). Esta solución tiene como objetivo proporcionar una mejor respuesta de la red en situaciones en las que la escalabilidad, el retraso o el consumo de energía pueden suponer un problema, teniendo en cuenta que la optimización para requisitos específicos tiene un coste o una compensación, ya que maximizar un parámetro determinado afecta directamente a los demás.

Por lo tanto, para esta configuración ABPC, algunos parámetros son fijos y predefinidos, en este caso el tamaño de la carga útil de los mensajes de enlace descendente (que también

podría cambiarse durante el tiempo de ejecución si fuera necesario), mientras que el resto de los parámetros cambiarán para adaptarse al escenario y a la aplicación en ejecución, como pretende el mecanismo.

Para ajustar el mecanismo en función de los resultados, el tamaño de la red a simular se elige asumiendo que durante un período de Beacon existe un número máximo teórico de pingslots utilizados para enviar paquetes con éxito, S_{max} (máximo de slots utilizables), teniendo en cuenta únicamente el ciclo de trabajo, sin considerar la selección aleatoria de slots al inicio de cada ventana, como se ve en la Tabla 5.3. La simulación se basa en las librerías para ns3 del capítulo 3.1.1, con los cambios y modificaciones correspondientes para el mecanismo de planificación ABPC descrito.

Tabla 5.3: Consideraciones de diseño basadas en el tamaño de paquete, duty cycle y beacon period

Beacon Period	b_w (s)	Payload	ToA (ms)	T_{DC} (s)	Max Slot usables (S_{max})
W64	58.88				16
W128*	120.88				32
W256	250.88	50 bytes	369.7	3.327	68
W512	504.88				136
W1024	1018.88				276

S_{max} se utiliza como entrada para seleccionar el número de nodos en la red durante la simulación, y como parámetro de activación para que el ABPC cambie las configuraciones, con el fin de comparar con el modelo. Se supone que los nodos están configurados para recibir un paquete por período de baliza (b_p), que corresponde a un intervalo de ping.

Por lo tanto, se supone que la entrada para el algoritmo en esta etapa es S_{max}. El valor de S_{max} se puede calcular de acuerdo con la ecuación 5.11, conociendo el tamaño de la carga útil de los paquetes y el SF (para obtener el ToA), el ciclo de trabajo y el tamaño del período de baliza configurado (que se refleja en la ventana de baliza b_w):

$$S_{max} = \frac{b_w}{ToA + T_{DC}} \tag{5.11}$$

Los valores obtenidos permiten validar el modelo analítico presentado en la sección 5.3 anterior, que luego puede usarse para entrenar este elemento de toma de decisiones del ABPC en futuras implementaciones. El gateway sabe cuántos dispositivos están conectados y requieren mensajes de enlace descendente, y tiene reglas predefinidas, dependiendo de la aplicación, para mantener ciertos niveles de QoS, como el PDR y la energía, de modo que el modelo puede determinar si es necesario cambiar el tamaño del período de baliza para esos requisitos. El gateway, luego, actualiza la configuración de sincronización en los nodos a través de los paquetes de baliza al inicio de cada período de baliza. Este algoritmo se resume en el diagrama de flujo de la figura 5.4 y en el pseudocódigo de la figura 5.5.

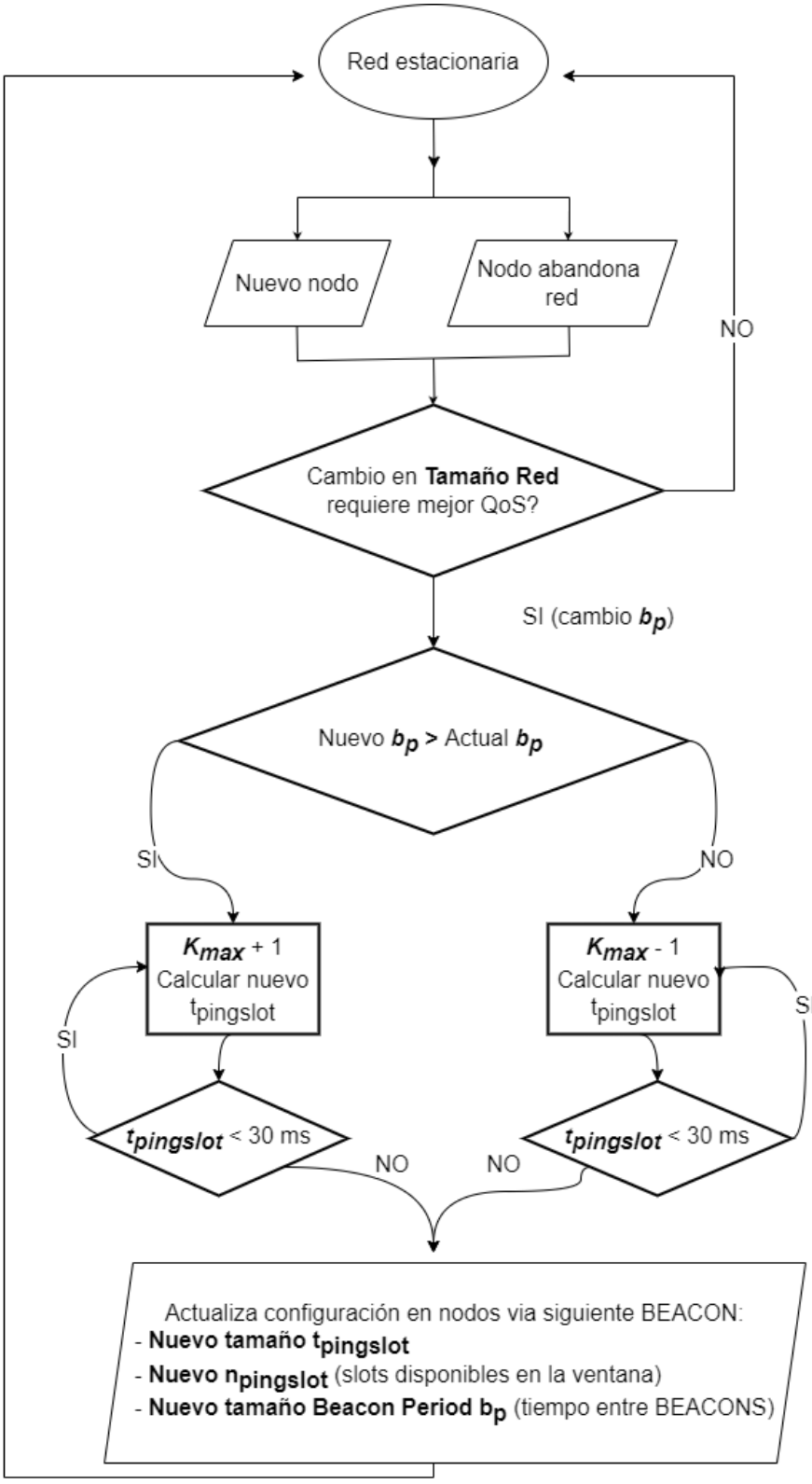


Figura 5.4: Diagrama de flujo de ABPC

```
// --- Definicion de Variables y Constantes ---
VARIABLE RedEstacionaria: LISTA
VARIABLE bpActual: ENTERO
VARIABLE tPingslotActual: REAL
VARIABLE DimensionRedActual: ENTERO
CONSTANTE TminPingslot = 30

// --- Bucle Principal de Gestion ---
PROCEDIMIENTO GestionarRed()

  ESPERAR hasta que un nodo cambie

  DimensionRedNueva = Longitud(RedEstacionaria)
  SI (DimensionRedNueva != DimensionRedActual)
  ENTONCES
    bpNuevo = Calcular_QoS(DimensionRedNueva)

    SI (bpNuevo > bpActual)
    ENTONCES
      tPingslotNuevo = Calcular_Pingslot(Kmax + 1)
    SINO
      tPingslotNuevo = Calcular_Pingslot(Kmax - 1)
    FIN SI

    SI (tPingslotNuevo >= TminPingslot)
    ENTONCES
      tPingslotActual = tPingslotNuevo
      bpActual = bpNuevo
      DimensionRedActual = DimensionRedNueva
      EnviarConfiguracionEnBeacon(...)
    FIN SI
  FIN SI
FIN PROCEDIMIENTO
```

Figura 5.5: Pseudoalgoritmo ABPC

5.4.1 Simulaciones ABCP

El escenario propuesto para las pruebas y la validación se establece en una planta industrial de 2 km de radio y un modelo de canal de propagación realista como el introducido en [52] y descrito en el capítulo 3.2, con un número variable de dispositivos finales que van desde 4 a 1104, dependiendo del tamaño de red seleccionado debido a las consideraciones de diseño. Este número de dispositivos finales es realista para una aplicación industrial y se deriva de valores proporcionales de S_{max}.

Es necesario resaltar que los valores de S_{max} que se muestran en la tabla 5.3 no siempre son potencias de 2 como el *beaconPeriod*, por lo que, por ejemplo, un valor de 4 veces S_{max} para el W1024 da como resultado 1104 nodos. Los valores más altos de *beaconPeriod* y S_{max} no se consideran en este momento porque introducirían demasiado tiempo de espera entre períodos, pero se podría explorar en el futuro para una red tolerante al retardo sin restricciones de tiempo.

El servidor de aplicación está generando mensajes de enlace descendente con una tasa de 1 paquete por *beacon window* por nodo (cualquiera que sea la longitud del *beaconPeriod*), mientras que los dispositivos finales solo envían mensajes de enlace ascendente (en enlace ascendente siempre se comportan como clase A) cada hora. En la Tabla 5.4 se muestra un resumen de las configuraciones utilizadas.

Tabla 5.4: Configuración del escenario simulado

Parámetro	Descripción	Valor
N	Numero de nodos	$S_{max}/4 \leq N \leq 4S_{max}$
k_{max}	Máxima Periodicidad	$5 \leq k_{max} \leq 10$
k	Periodicidad	$0 \leq k \leq k_{max}$
pingPeriod	Ping Period según k	$n_{pingslot}/2k$
Beacon Period	Duración de un beaconPeriod	$[64, 128, 256, 512, 1024]$
λ	Tasa de llegadas	$N \cdot pingPeriod$
SF	Spreading Factor downlink	9
$M_{downpayload}$	Tamaño de paquete	50 Bytes
ToA	Tiempo en el aire	369.7 ms
DC	Límite de Duty cycle en sub-banda g3	10%

En el escenario simulado, el número de nodos se mantiene fijo durante 24 horas, tras lo cual se aumenta el tamaño de la red (ver parámetro N en la tabla 5.4), lo que activa el ABPC y la reconfiguración de los parámetros de clase B, repitiendo el ciclo para lograr 24 horas de estadísticas para cada configuración.

Para calcular los diferentes consumos de energía en las diferentes configuraciones, se ha utilizado un valor de 11 mA para el consumo de radio durante el tiempo de recepción/escucha, tal como se extrae de las hojas de datos de los chipsets de Semtech. El consumo real de un dispositivo también debe considerar otros elementos como la Unidad Central de Procesamiento (CPU), sensores, memoria, etc. Pero esos parámetros están relacionados con el hardware y la aplicación y no se ven afectados por la solución propuesta que se relaciona solo con los aspectos de radio.

Como referencia, se calcula un ejemplo de duración de la batería asumiendo una configuración de batería común de 3000 mAh (dos baterías alcalinas AA) y una CPU ESP32 con el chipset de radio LoRa SX1276. Como referencia, los tiempos de respuesta relacionados son 369,7 ms para paquetes de datos de 50 bytes, 160 ms para balizas y 30 ms para ranuras de ping vacías. En la Tabla 5.5 se muestra un resumen de los parámetros relacionados con la potencia.

Tabla 5.5: Parámetros de energía y consumo

Parámetro	Descripción	Valor
I_{TX}/I_{RX}	Consumo de corriente de la radio activa	11 mA
$I_{deepsleep}$	Consumo de corriente de la CPU en reposo	7 µA
I_{CPU}	Consumo de corriente de CPU activa	50 mA
ToA	Tiempo en el aire para recibir un mensaje normal	369.7 ms
ToA_{beacon}	Tiempo en el aire para recibir balizas	160 ms
ToA_{empty}	Tiempo en el aire escuchando slots vacíos	3.697 s

5.4.2 Análisis de resultados de ABPC y validación del modelo analítico

Para validar la solución ABPC propuesta, se simula el escenario seleccionado bajo ns3 y se compara con el modelo analítico. Para representar las diferentes configuraciones según Beacon Period, en los títulos de las figuras se muestra una convención de nomenclatura de W64 a W1024 como en la tabla 5.3. También es relevante para el análisis de los resultados destacar que la configuración W128 corresponde a la propuesta del estándar, por lo que también es una configuración clave en la comparación.

En primer lugar, se presenta un análisis detallado de los eventos en el búfer del gateway, caracterizando el funcionamiento de este elemento para las diferentes configuraciones, mostrando el PDR (ratio de entrega de paquetes, que es el porcentaje de mensajes recibidos versus lo esperado, por lo tanto, la probabilidad de transmisión exitosa), y el PLR (ratio de pérdida de paquetes) debido a los diferentes tipos de eventos.

Luego, en la parte de los dispositivos o nodos finales, se obtienen los resultados en términos de retardo entre paquetes consecutivos de bajada, PDR y consumo de energía. El número de dispositivos utilizados se muestra en los resultados como múltiplos de N, donde $N = S_{max}$, y los valores de S_{max} se pueden observar en la tabla 5.3. Esto es importante al leer las figuras, ya que los valores de N, de hecho, son diferentes entre las configuraciones de Beacon Period.

Desde la perspectiva del gateway, como se muestra en la figura 5.6, el principal problema detectado en todos los casos es que los paquetes pierden sus pingslots de transmisión debido a limitaciones del ciclo de trabajo, seguido por el hallazgo de que el pingslot programado aún está en uso por otra transmisión de mensajes (ya sea de enlace descendente o ascendente).

Esto se puede ver como la serie etiquetada como "DC PLR", que describe los paquetes descartados en el búfer del gateway, son los más significativos y crecen considerablemente con el número de dispositivos. Las barras con relleno punteado y borde de color son PDR, mientras que la serie PLR son barras de color sólido. Con respecto a las configuraciones, los Beacon Period más largos sufren menos de los eventos de ciclo de trabajo y ranura ocupada, logrando un mayor porcentaje de paquetes transmitidos con éxito para la misma cantidad de nodos finales.

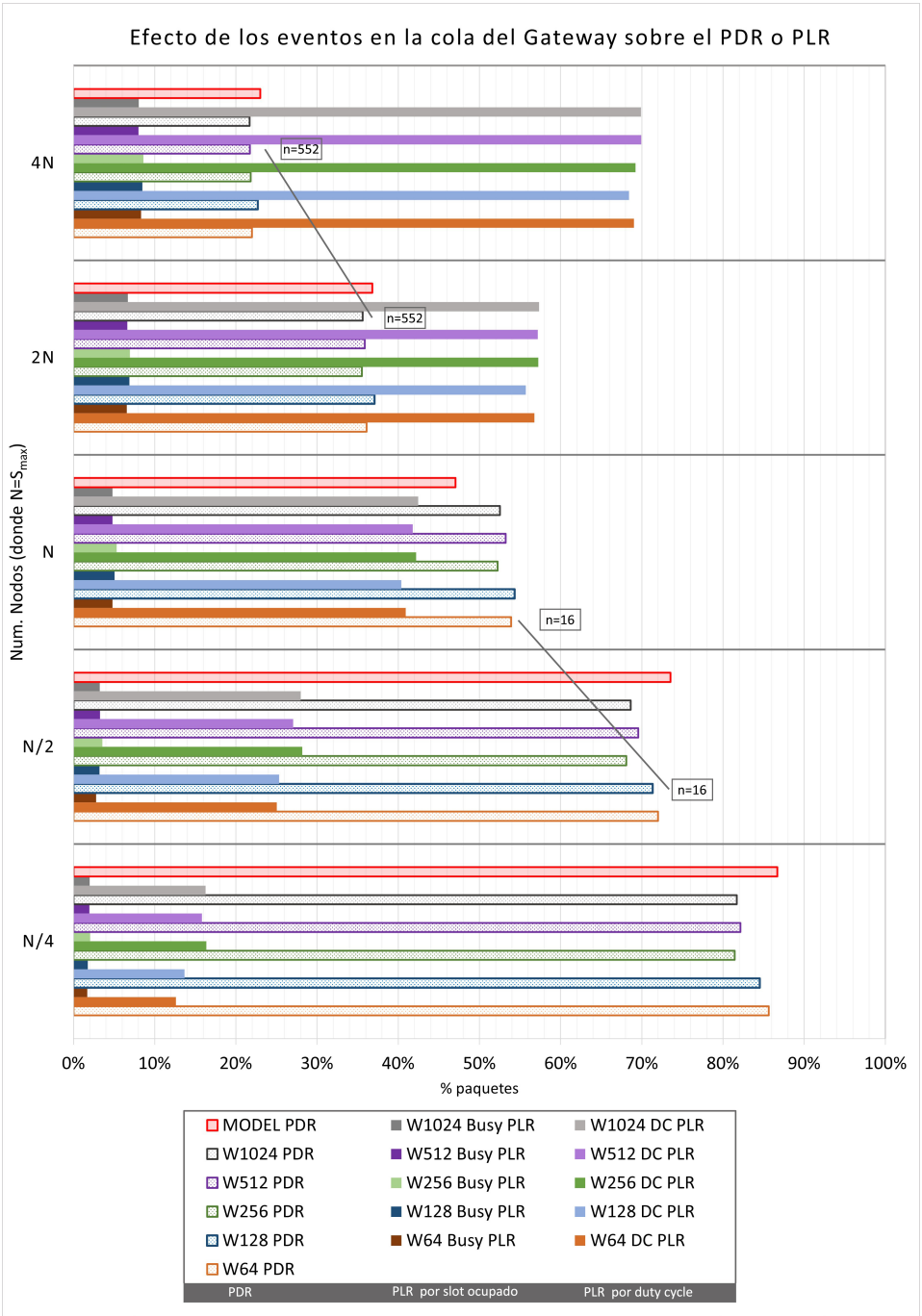


Figura 5.6: Impacto de los diferentes eventos en la cola del gateway según el tamaño de la red y del tamaño de la ventana planificada

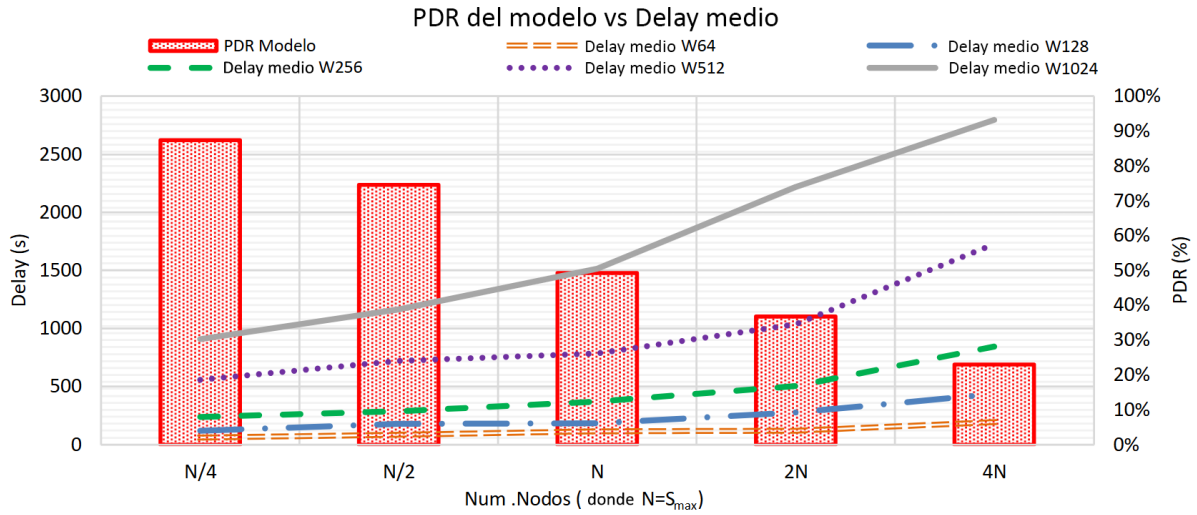


Figura 5.7: PDR y delay medio según tamaño de red y Beacon Period

En la figura 5.6 se muestran los valores resaltados para el número de nodos, que son 16 o 552, ya que N depende de S_{max} (en esos casos $S_{max} = 16$ o 276; véase la Tabla 5.3 para la relación con los tamaños de los períodos de balizas) como ejemplo.

Los valores de PDR para el modelo analítico, que corresponden al porcentaje de mensajes transmitidos, también se muestran en la figura 5.6, por lo que se puede ver que el modelo describe bien los resultados esperados.

Como las entradas del modelo están relacionadas con el tráfico inyectado al gateway, y esto está relacionado con el tamaño del período de balizas, estadísticamente el modelo solo depende del tiempo entre llegadas de paquetes al gateway y, por lo tanto, depende de N pero es independiente del tamaño de la ventana de balizas.

Con respecto a los nodos, aumentar el tamaño del periodo de balizas y el periodo de ping aumenta el tiempo de espera o demora, pero vale la pena señalar que este aumento no parece ser directamente proporcional (duplicar el tamaño del periodo de balizas no duplica automáticamente el tiempo entre paquetes). Esto también se aplica al número de paquetes recibidos con éxito en los nodos, ya que los resultados muestran que incluso al reducir la tasa de generación de mensajes (incrementando *pingNb*).

Esto supone que para un Beacon Period de 256 s (W256), el gateway está intentando transmitir la mitad de la cantidad de paquetes que para un Beacon Period de 128 s (W128), pero en el extremo del nodo esto no se traduce en la mitad de mensajes. Depende del tamaño de la red, ya que cuando el número de nodos crece, el retardo entre mensajes en el extremo de los nodos se iguala, al igual que el número de mensajes recibidos. Pero, por otro lado, el consumo de energía se vuelve menor con ventanas de balizas más largas.

En la figura 5.7 se puede ver cómo el retardo aumenta y el PDR (usando los valores del modelo) disminuye al aumentar el número de dispositivos. Este aumento del retardo es más pronunciado cuanto mayor es W, siendo casi despreciable para W64 y muy pronunciado para W1024.

En cuanto al consumo de energía, se ha obtenido la corriente media I_m por hora después de 24 horas. La razón para usar la corriente es que el voltaje es un valor fijo (normalmente 3,3 V o 5 V para dispositivos alimentados por batería). Esto se puede ver ya que las baterías también muestran su capacidad en mAh.

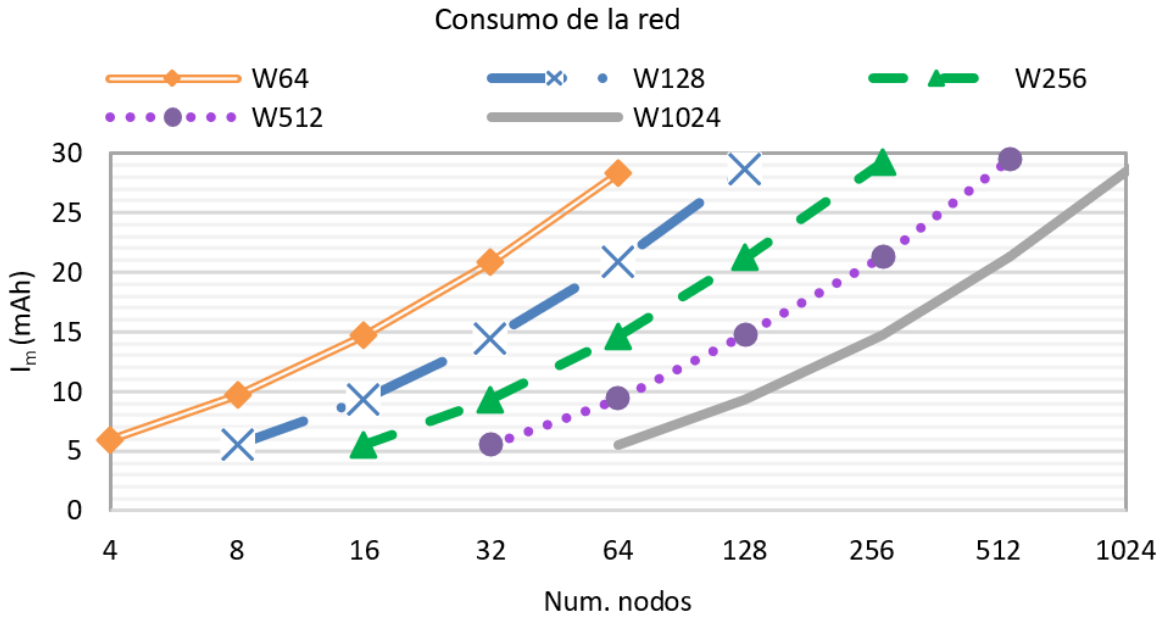


Figura 5.8: Consumo en la red según Beacon Period y número de nodos

El cálculo considera el número de paquetes recibidos por cada nodo, el tiempo que tarda en recibirlos y lo mismo para las balizas. Luego, el resto del consumo proviene de los nodos que habilitan la recepción de radio durante el tiempo mínimo para escuchar preámbulos y se apagan si no hay datos presentes en el canal.

Aumentar el tamaño del Beacon Period reduce automáticamente la cantidad de balizas de sincronización transmitidas, lo que significa reducir el tiempo que se espera que un dispositivo final esté escuchando; por lo tanto, tiene un impacto directo en el ahorro de energía. Como se puede ver en la Tabla 5.2, los tamaños de ventana superiores (o inferiores) a 128 s dan como resultado duraciones de pingslot más largas, superiores a 30 ms.

Teniendo en cuenta que el tiempo mínimo real necesario, independientemente del tamaño de la ventana o el SF, para detectar el preámbulo de una trama entrante es de 30 ms, desde el punto de vista de la radio del dispositivo final, esa es la cantidad de tiempo que tiene que estar escuchando. La duración modificada de la longitud del pingslot es relevante para la sincronización, de modo que la puerta de enlace y los dispositivos finales sepan cuándo comenzar a transmitir/recibir, pero el tiempo mínimo de radio activa cuando comienza el pingslot se puede considerar fijo en 30 ms para todas las configuraciones. Por lo tanto, no afecta negativamente al consumo de energía.

Por otro lado, aumentar (o disminuir) la periodicidad (k) hace que cada nodo se despierte con mayor o menor frecuencia, por lo que períodos más largos que permitan valores de periodicidad más altos consiguen (a costa de mayores retrasos) una mayor duración de la batería. Esto se puede ver en las figuras 5.8 y 5.9.

Además, la figura 5.9, que se obtiene a partir de una red con 64 nodos como ejemplo, también muestra la duración de las baterías (3000 mAh) con el hardware descrito en la sección 5.4.1.

Este cálculo asume que la CPU está en estado de sueño profundo mientras la radio está inactiva y se activa cuando es el momento de recibir (depende del tamaño de la ventana Beacon) o enviar mensajes (fijado a uno por hora).

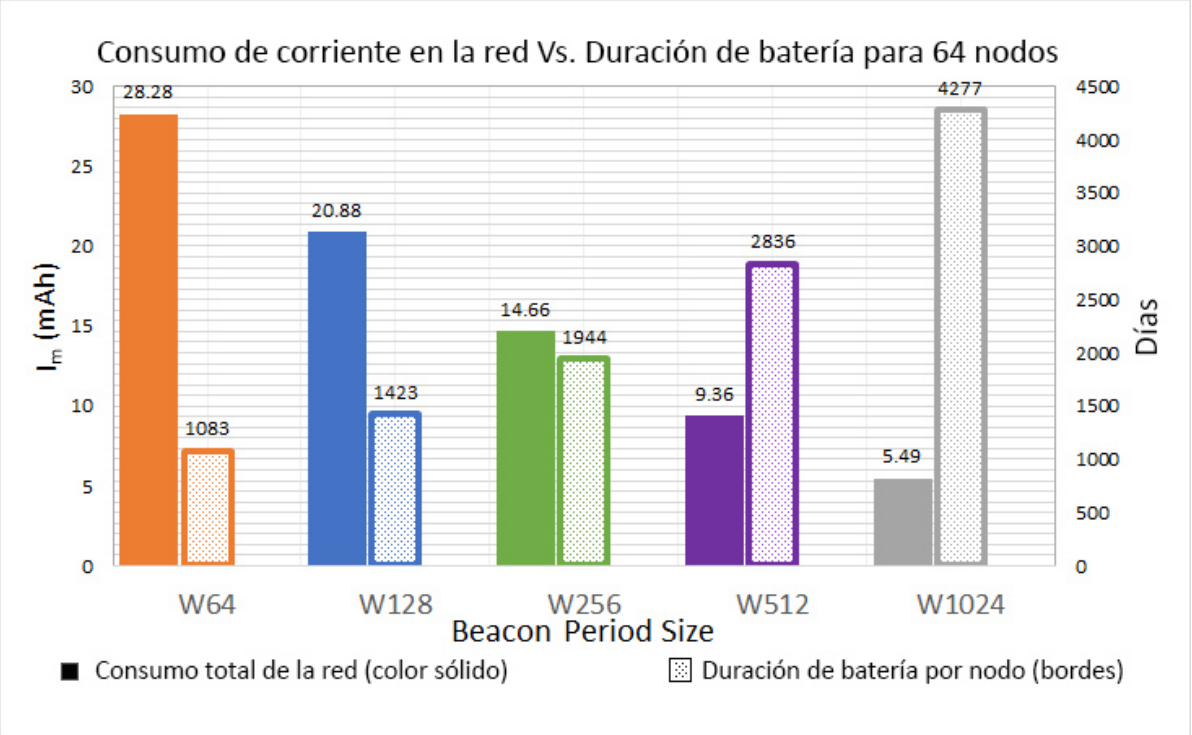


Figura 5.9: Tiempo de vida de la red según consumo energético

Los resultados muestran lo relevante que puede ser cambiar los períodos Beacon, si es posible, ya que los nodos pueden beneficiarse de hasta un 200% más de días de funcionamiento que con el estándar. Esta duración de la batería cae drásticamente si el hardware no soporta el sueño profundo, pero es una característica que la mayoría de los fabricantes incluye en sus productos hoy en día.

5.5 Conclusiones

La introducción del modo de clase B en LoRaWAN es clave para soportar mensajería de enlace descendente sin necesidad de dispositivos finales para activarla. El creciente interés en el uso de estas redes en aplicaciones industriales, ha demostrado que todavía existen problemas de optimización y escalabilidad que pueden beneficiarse de enfoques de programación más flexibles.

Los resultados obtenidos al probar diferentes configuraciones de tamaños y periodicidades de Beacon Period, respaldados por el mecanismo de adaptación de duración de pingslot descrito, muestran que los parámetros propuestos por el estándar se pueden optimizar aún más de acuerdo con el tamaño de la red y las especificaciones o calidad de servicio requeridas por la aplicación.

Por un lado, el tamaño de la red puede afectar en gran medida el rendimiento de la red, especialmente para LoRaWAN clase B y su operación programada. En los casos en los que la escalabilidad puede ser un problema, vale la pena tener la oportunidad de adaptar las configuraciones para mejorar la operación de la red y mantener un cierto nivel de PDR, a pesar del aumento del retraso.

Por otro lado, otros casos presentan un número reducido de dispositivos finales, y puede ser de interés favorecer otros parámetros clave aprovechando que hay más recursos disponibles en el gateway. De los resultados se desprende que el uso de tamaños de Beacon Period más pequeños beneficia el retardo entre mensajes y, lógicamente, el número total de mensajes recibidos.

La tendencia de estos parámetros se iguala a medida que la red crece, lo que significa que para redes muy grandes, el retardo y los mensajes recibidos ya no están directamente influenciados por el tamaño de Beacon Period a menos que este también aumente considerablemente, hasta el punto de que la red sea inútil porque el retardo y la pérdida de paquetes son demasiado altos.

Los otros aspectos relevantes, como el consumo de energía y el PDR, siguen la lógica inversa. Si las características clave requeridas son una mayor duración de la batería en los dispositivos finales, entonces los Beacon Periods más largos logran resultados mucho mejores, considerando que las redes grandes presentan niveles medios similares de retardo y mensajes recibidos por nodo.

Gracias al modelo y las curvas obtenidas para PDR, retardo y energía, el gateway puede inferir de antemano el comportamiento de la red según los dispositivos finales conectados y tomar decisiones bien fundamentadas sobre las configuraciones del tamaño de Beacon Period o incluso sobre el bloqueo de nuevos dispositivos para garantizar los requisitos predefinidos.

El punto en el que la adaptabilidad ya no es beneficiosa se puede calcular con estos datos y algoritmo, y compararlo con los requisitos del usuario. Por ejemplo, un retraso de una hora puede ser razonable para actualizaciones de configuración o solicitudes de telemetría no críticas, pero otros tipos de mensajes, como activaciones, requerirían un límite de segundos.

Capítulo 6

Polling para sistemas de adquisición de datos

6.1 Introducción

Hasta ahora, el desarrollo de soluciones para LoRaWAN de los capítulos anteriores ha servido para optimizar el tráfico descendente y garantizar la calidad de servicio cumpliendo ciertos KPIs. Sin embargo, sigue faltando integrar una forma eficaz de recoger información de los dispositivos, manteniendo la compatibilidad con un tráfico descendente más versátil y con garantías en la comunicación de grado industrial.

Uno de los desafíos es que el IIoT es un entorno complejo y heterogéneo, con una amplia variedad de dispositivos y redes. Esto puede dificultar el cumplimiento de los requisitos de seguridad funcional en todos los dispositivos y redes. Otro desafío es que el IIoT es un entorno dinámico, con dispositivos y redes en constante cambio. Esto puede dificultar el mantenimiento de la seguridad funcional a lo largo del tiempo.

El IIoT es una solución en auge para recopilar datos de un gran número de dispositivos, lo que, como se puede observar, conlleva desafíos. En este ámbito, un sistema polling es una forma popular de recopilar datos en casos de uso industrial y digitalización debido a su simplicidad y eficiencia. En ese caso, un servidor central sondea cada dispositivo a intervalos regulares, y el dispositivo envía los datos que ha recopilado. Esto puede completarse a través de una variedad de redes, incluyendo cableadas, inalámbricas y celulares.

Ventajas del Polling:

- Simplicidad: El polling es una forma sencilla y directa de recopilar datos. El servidor central no necesita información sobre los dispositivos a los que sondea, y estos no necesitan comunicarse entre sí.

- Eficiencia: El polling puede ser una forma eficiente de recopilar datos, especialmente si los dispositivos no generan muchos datos. El servidor central puede sondear los dispositivos

a intervalos regulares, y los dispositivos solo necesitan enviar los datos que han cambiado desde el último polling.

- Escalabilidad: El polling puede escalarse para adaptarse a un gran número de dispositivos. El servidor central simplemente puede sondear más dispositivos a intervalos regulares.

Desafíos del Polling:

- Latencia: El polling puede introducir latencia en el sistema. El tiempo que tarda el servidor central en sondear un dispositivo y el tiempo que tarda el dispositivo en enviar los datos puede acumularse.

- Consumo de batería: El polling puede agotar las baterías de los dispositivos que se están sondeando. Si los dispositivos se sondean con demasiada frecuencia, las baterías pueden no durar tanto tiempo.

- Uso de ancho de banda: El polling puede consumir mucho ancho de banda, especialmente si el maestro de polling solicita a los dispositivos que generen datos con mayor frecuencia.

El polling se ha utilizado durante décadas para recopilar datos de una variedad de dispositivos. Esto significa que hay muchas herramientas y recursos disponibles para ayudar a implementar el polling en un sistema. Es compatible con una amplia gama de equipos, incluyendo sensores, actuadores y controladores. Esto lo convierte en una solución flexible y versátil para la recopilación de datos en casos de uso industrial, que comprenden aplicaciones como la monitorización ambiental, el seguimiento de activos o la medición inteligente.

Si bien las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) ofrecen una larga duración de la batería, bajas tasas de datos y una amplia cobertura, su ancho de banda limitado presenta desafíos para el polling en las aplicaciones del Internet Industrial de las Cosas (IIoT). Esto es particularmente cierto para LoRaWAN, una tecnología LPWAN popular. Aunque LoRaWAN cuenta con un largo alcance, baja potencia, amplia disponibilidad, seguridad y despliegue de red privada, sus limitaciones de ancho de banda requieren una cuidadosa consideración al emplear técnicas de polling.

El artículo de [53] proporciona una descripción general de los protocolos MAC de contención y polling en el dominio de la frecuencia para redes inalámbricas IEEE 802.11. El artículo analiza las ventajas y desventajas de estos protocolos, así como su rendimiento en diferentes escenarios. En [54] se propone un nuevo algoritmo de selección de velocidad para redes de área local inalámbricas (WLAN) industriales IEEE 802.11. El algoritmo, denominado Selección de velocidad para redes industriales (RSIN), está diseñado para minimizar la probabilidad de error de los paquetes de polling, al tiempo que considera la fecha límite impuesta a la entrega de paquetes. En [55] se muestra un prototipo de implementación de un sistema de control inalámbrico industrial crítico basado en comunicación de ultra confiabilidad y baja latencia (URLLC). El sistema utiliza un esquema de polling para garantizar que todos los sensores se lean y que todos los actuadores se actualicen dentro de un plazo ajustado.

En el artículo de [56] se propone un algoritmo de programación de tráfico acíclico (ATSA), que no está diseñado específicamente para el tráfico de polling. Sin embargo, ATSA se puede utilizar para programar el tráfico de polling, dando al tráfico de polling una prioridad más alta que otro tráfico acíclico. Esto garantizará que los paquetes de tráfico de polling siempre se transmitan antes que otros paquetes de tráfico acíclico. En [57] se propone un nuevo protocolo de control de acceso al medio (MAC) para redes basadas en OFDMA (como Wi-Fi o celular) en sistemas ciberfísicos (CPS). El protocolo, denominado polling de dominio de frecuencia

con reconocimiento de prioridad (PAFDP), está diseñado para mejorar la confiabilidad y el rendimiento de las redes CPS mediante el uso de polling con reconocimiento de prioridad y diversidad de frecuencia.Otro ejemplo se encuentra en [58], donde proponen un esquema de transmisión basado en polling para aplicaciones industriales de IoT. El esquema está diseñado para mejorar la uniformidad del tráfico de red, lo que puede conducir a un mejor rendimiento y eficiencia energética.

En una solución más aproximada a lo que podría ser un polling basado en LPWAN, el trabajo reciente mostrado en [59] propone AlLoRa, un sistema basado en LoRa para monitorización ambiental en ubicaciones remotas. Presenta un protocolo modular con capacidad de transferir archivos de mayor tamaño mediante fragmentación, introduciendo una solución similar al polling donde la transmisión se inicia en el receptor bajo demanda. Al controlar el tráfico bajo demanda, se ignoran limitaciones de duty cycle, reduciendo así la latencia considerablemente, a costa de no ser una solución escalable para redes de tamaño medio-grande. El uso de LoRaWAN en lugar de LoRa proporciona mayor seguridad y escalabilidad, aportando facilidad de administración para redes de mayor tamaño. Además, el mecanismo de polling descrito en este capítulo también considera las posibles regulaciones del duty cycle en la banda de frecuencias utilizada. Es cierto que si el acceso al medio se gestiona con un controlador, en un entorno aislado esta limitación se puede ignorar. En cambio, en escenarios industriales, la coexistencia con otras redes y un mayor número de dispositivos desplegados requiere del cumplimiento de los límites de las regulaciones para un uso adecuado del canal (*fair access policies*).

Centrando el estudio en los desafíos específicos en LoRaWAN, se encuentran diferentes retos:

- Sobrecarga de ancho de banda: El polling puede consumir una cantidad significativa de ancho de banda, lo que puede ser un problema para LoRaWAN.

- Latencia: El polling puede introducir latencia, ya que el controlador central debe esperar a que cada dispositivo responda antes de poder solicitar datos al siguiente dispositivo.

- Consumo de energía: El polling también puede aumentar el consumo de energía de los dispositivos, ya que deben despertarse del modo de suspensión para responder a las solicitudes de polling.

Aún así, LoRaWAN es más adecuado para un sistema de polling que otras LPWAN porque admite diferentes políticas de acceso al medio que permiten una comunicación de enlace descendente más eficiente. Este característica es clave para habilitar nuevas soluciones para reducir las latencias, aprovechar el soporte multicast para reducir la sobrecarga y tener una mejor gestión del consumo de energía.

Dentro de las clases de dispositivos LoRaWAN, la Clase B y la Clase C tienen diferencias fundamentales en su capacidad para recibir mensajes y gestionar la energía. La elección entre ellas depende de varios factores relacionados con el entorno y los requisitos específicos de la aplicación. La Clase A se centra en el enlace ascendente, donde solo el dispositivo final puede iniciar el intercambio de datos, por lo que se descarta para aplicaciones de polling. A continuación, se exploran escenarios donde el polling es más apropiado para cada clase.

- Clase B: Permite la comunicación bidireccional asíncrona, lo que significa que los dispositivos de Clase B pueden recibir mensajes en momentos programados conocidos como "ranuras de recepción" o "intervalos de recepción". Este enfoque es útil en entornos donde se necesita un equilibrio entre el ahorro de energía y la capacidad de respuesta. Esto es particularmente beneficioso en escenarios donde los dispositivos necesitan comunicarse

periódicamente, como en aplicaciones de monitorización remota, o en general cuando el tráfico es bajo, ya que ayuda a conservar energía al minimizar la escucha innecesaria.

- Clase C: A diferencia de la Clase B, permite la recepción continua de mensajes, sacrificando parcialmente la eficiencia energética para aumentar la capacidad de respuesta. Aquí, el polling síncrono se convierte en una estrategia eficaz en entornos donde la latencia es crítica, como los sistemas de seguridad o el seguimiento de activos en tiempo real, o en situaciones donde la densidad de nodos es alta y el tráfico de datos es constante.

Ambas clases pueden utilizarse para implementar un sistema de polling. La elección entre la Clase B y la Clase C en una aplicación de polling LoRaWAN depende de la naturaleza de la aplicación y los requisitos de consumo de energía. La Clase B es adecuada para entornos donde la eficiencia energética es crucial y el tráfico de datos es esporádico, mientras que la Clase C es preferible en situaciones que requieren una mayor capacidad de respuesta y están dispuestas a aceptar un mayor consumo de energía.

6.2 Diseño y resultados del planificador en clase B

Al utilizar la Clase B para polling bajo el estándar, las colisiones en la operación pueden ocurrir con frecuencia. Dado que la estación de red (NS) asigna ranuras de forma aleatoria, un nodo puede comenzar a responder al mensaje de enlace descendente cuando la puerta de enlace (GW) ya ha comenzado a enviar otro. Además, un nodo puede estar en medio de un enlace ascendente, que comenzó cuando la radio del GW estaba libre para la recepción, cuando debería abrirse una ranura programada de enlace descendente.

En resumen, la radio del GW no puede recibir y transmitir al mismo tiempo, por lo que cuando concurren eventos de enlace descendente y enlace ascendente, el que se inició primero tiene prioridad y el otro evento se pierde (como se puede ver en la figura 5.1 en la sección 5.2).

Para evitar esto y permitir que los nodos transmitan de manera eficiente, solo deben transmitir inmediatamente después, y solo después, de recibir un enlace descendente. Esto asegura que la radio del GW no pueda estar en modo de transmisión, ya que necesita esperar un tiempo determinado debido a las regulaciones del ciclo de trabajo, y por lo tanto estará escuchando. También asegura que ningún otro nodo ocupará el canal y causará una posible colisión. Para lograr esta implementación particular de un sistema de polling, LoRaWAN Clase B requiere algunos cambios de configuración y optimización.

Debido a problemas de escalabilidad en este tipo de redes, los parámetros estándar de la Clase B del período de baliza (Beacon Period), la ventana de baliza (Beacon Window) y el tamaño del slot no son adecuados para un sistema de polling utilizable, ya que esto introduce muchas pérdidas de paquetes y ranuras perdidas. En este caso, la solución que permite un sistema de polling factible se logra aprovechando el mecanismo ABPC para aplicaciones de enlace descendente LoRaWAN escalables. La descripción detallada del ABPC se puede encontrar en la sección 5.4 o en el artículo [60].

El ABPC funciona ajustando dinámicamente el período de baliza de las puertas de enlace LoRaWAN. El período de baliza es el intervalo en el que las puertas de enlace transmiten tramas de baliza. Las tramas de baliza son utilizadas por los dispositivos finales para sincronizar sus relojes y conocer los canales disponibles. De esta forma, puede ajustar el período de baliza en función de los siguientes factores: el número de dispositivos finales en la red, la carga de tráfico en la red, las condiciones del canal, las restricciones de la batería o los requisitos de latencia.

El ABPC aumenta el período de baliza cuando la red está congestionada o cuando las condiciones del canal son malas. Esto reduce la sobrecarga de las tramas de baliza y mejora el rendimiento del tráfico de enlace descendente. El ABPC disminuye el período de baliza cuando la red no está congestionada y cuando las condiciones del canal son buenas. Esto reduce la latencia del tráfico de enlace descendente, lo que es vital para implementar un sistema de polling efectivo en este tipo de redes que se ven afectadas por varios factores, entre ellos:

- Densidad del tráfico: cuanto mayor sea la densidad del tráfico, ya sea por el número de dispositivos o paquetes por dispositivo, mayor será el período de baliza necesario para soportar este tráfico, lo que puede aumentar la latencia del enlace descendente.

- Tamaño de la carga útil del mensaje: una carga útil del mensaje más grande significa que las puertas de enlace necesitan transmitir más datos, lo que puede aumentar la latencia del enlace descendente y la probabilidad de eventos de colisión.

Combinando el algoritmo ABPC con un sistema de polling adaptado a las características de LoRaWAN, se puede mejorar el rendimiento del enlace descendente LoRaWAN en gran variedad de escenarios, incluyendo:

- Escenarios de alto tráfico: en escenarios de alto tráfico, se puede reducir la latencia del enlace descendente ajustando el período de baliza a la baja y aplicando agrupaciones multicast para el polling.

- Escenarios de bajo tráfico: en escenarios de bajo tráfico, se puede mejorar la eficiencia energética de los dispositivos finales.

- Escenarios con densidad de tráfico variable: en escenarios con densidad de tráfico variable, se puede ajustar automáticamente el período polling para satisfacer las demandas cambiantes de la red.

En cuanto a la implementación del polling con ABPC, un programador que ejecuta este algoritmo en el servidor de red permite conocer de antemano el rendimiento de una red de Clase B y puede aumentar o disminuir el período de baliza para responder a diferentes tamaños de red, manteniendo al mismo tiempo los requisitos de la aplicación, como la PDR o la latencia. Este período es el que marcará los tiempos de polling que se pueden conseguir con el polling.

Además. para que un sistema de polling funcione, los nodos deben recibir mensajes de enlace descendente para habilitar las transmisiones, por lo que se utiliza ABPC para garantizar que la PDR sea $> 90\%$ adaptando el período de baliza.

La figura 6.1 muestra el sistema de polling para la Clase B en modo unicast para un período de baliza de 128 s típico. Téngase en cuenta que la duración de la ranura de ping y el período de baliza, después de que ABPC calcule los valores óptimos para esta configuración, pueden diferir del estándar.

Debido al carácter pseudoaleatorio del acceso al canal introducido por la selección del pingoffset de la Clase B al principio de cada período (ver ecuaciones 5.3 y 5.4 de la sección 5.2), y a la posible variabilidad en el tamaño de los paquetes de datos, no se puede garantizar una PDR del 100%.

Este offset aleatorio se utiliza para distribuir el tráfico de enlace descendente de manera más uniforme a través de los pingslots disponibles. Sin esta aleatoriedad, si todos los dispositivos

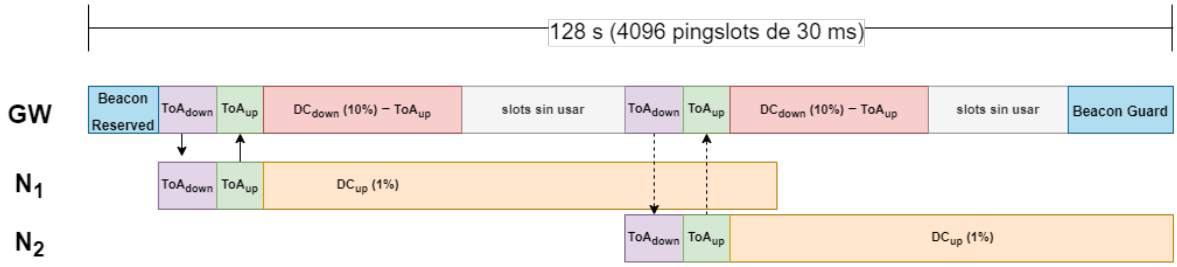


Figura 6.1: Polling en Clase B unicast

utilizaran el mismo pingslot o un patrón predecible, existiría una mayor probabilidad de colisiones en redes con más nodos que slots, y una mayor vulnerabilidad a la interferencia o el ruido. Al introducir un componente aleatorio, se reduce la probabilidad de que múltiples dispositivos intenten recibir datos de enlace descendente simultáneamente y se mitiga el impacto de interferencias o ruidos externos que afecten repetidamente a un pingslot específico. Sin embargo, puede tener el efecto contrario en redes con pocos nodos y con tráfico de tamaño variable y esporádico.

Un problema crítico que se debe abordar al utilizar la Clase B es la posibilidad de que un nodo sea sondeado antes de que finalice el tiempo de guarda del ciclo de trabajo después de la transmisión anterior. Esto puede suceder cuando el tiempo en el aire (ToA) y el tiempo del ciclo de trabajo son más largos que la guarda de baliza (b_g) más la reserva de baliza (b_r), que es 5.12 s, y el algoritmo selecciona una de las primeras ranuras en la ventana. Por lo tanto, se agrega un paso adicional en el programador ABPC para calcular el tiempo de guarda de baliza requerido para garantizar que la ranura no se pierda debido a este problema.

Tomando el ejemplo de la figura 6.1, si uno de los nodos es sondeado justo antes de la guarda de baliza, incluso si puede recibir correctamente el mensaje de polling de enlace descendente al comienzo de un nuevo período (porque la puerta de enlace utiliza la subbanda G3, lo que le permite utilizar 10 veces más tiempo de aire), el nodo no puede responder porque necesita esperar hasta que finalice su limitación de ciclo de trabajo.

Por lo tanto, el programador que ejecuta el ABPC necesita calcular el tiempo de guarda de baliza óptimo para evitar que esto suceda (ecuación 6.1), por lo que el período de baliza correcto puede ser mayor que 128 s. Esta es una modificación necesaria al ABPC para admitir aplicaciones de polling.

$$b_g = DC_{up} - b_r \tag{6.1}$$

Si los nodos y el gateway tienen soporte multicast, los mensajes de enlace descendente se pueden utilizar para activar el polling simultáneamente en un grupo de nodos (como se muestra en la figura 6.2 con un ejemplo de 4 nodos en un período de 128 s, antes del cálculo del tiempo de guarda de baliza óptimo), que luego transmiten al mismo tiempo pero en diferentes canales; el número de estos canales puede ser tan grande como lo admita el GW y se define como n_{ch} a partir de ahora. Esto da como resultado grupos multicast de tamaño n_{ch}.

Es relevante destacar que se descarta la posibilidad de utilizar la baliza de sincronización al comienzo de cada período, independientemente de unicast o multicast. La modificación de estas balizas podría romper la compatibilidad con los nodos estándar de Clase B y otros mensajes de enlace descendente que no están relacionados con el polling.

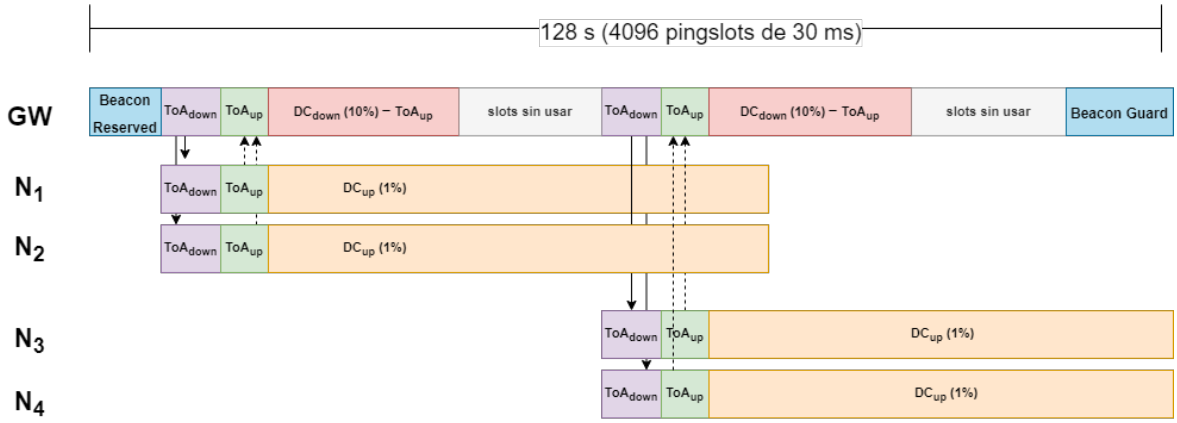


Figura 6.2: Polling en Clase B con soporte multicast

Tabla 6.1: Duración de la guarda de baliza calculada para diferentes configuraciones

SF	Beacon Guard (segundos)
SF7	0
SF8	17
SF9	31
SF10	60

Como se ha descrito anteriormente, el polling de Clase B introduce cierta aleatoriedad debido a la forma en que se seleccionan las ranuras para los nodos al comienzo de cada período de baliza. Este mecanismo, diseñado para mejorar la resistencia a la interferencia, significa que los períodos de polling en la Clase B representan latencias teóricas máximas en lugar de intervalos deterministas.

Con el mecanismo ABPC descrito sobre el programador de Clase B, el tiempo máximo de polling se deriva del período de baliza, pero puede ser más corto. La tabla 6.1 muestra la duración calculada de la guarda de baliza, de acuerdo con 6.1, utilizando el ABPC modificado.

En cuanto al análisis del tiempo máximo de Polling en Clase B, la figura 6.3 muestra una evolución escalonada o discreta en la duración máxima del tiempo de polling cuando cambia el tamaño de la red. Este comportamiento está directamente relacionado con la forma en que el programador de Clase B configura las duraciones del período de baliza, proporcional a las potencias de 2 y fijas para intervalos de tamaños de red. Como era de esperar, el uso de la solución multicast reduce el tiempo máximo de polling en un factor de n_{ch} frente al unicast. Esto se puede ver con más detalle en la figura 6.4, que muestra el impacto de n_{ch} en la latencia máxima de polling para un tamaño de red fijo de 100 nodos.

La relación en la latencia máxima entre dispositivos con diferentes factores de dispersión (SF) se vuelve más significativa cuando hay más canales disponibles. Este es otro punto a considerar al decidir operar con un número determinado de canales y al tener SF variables.

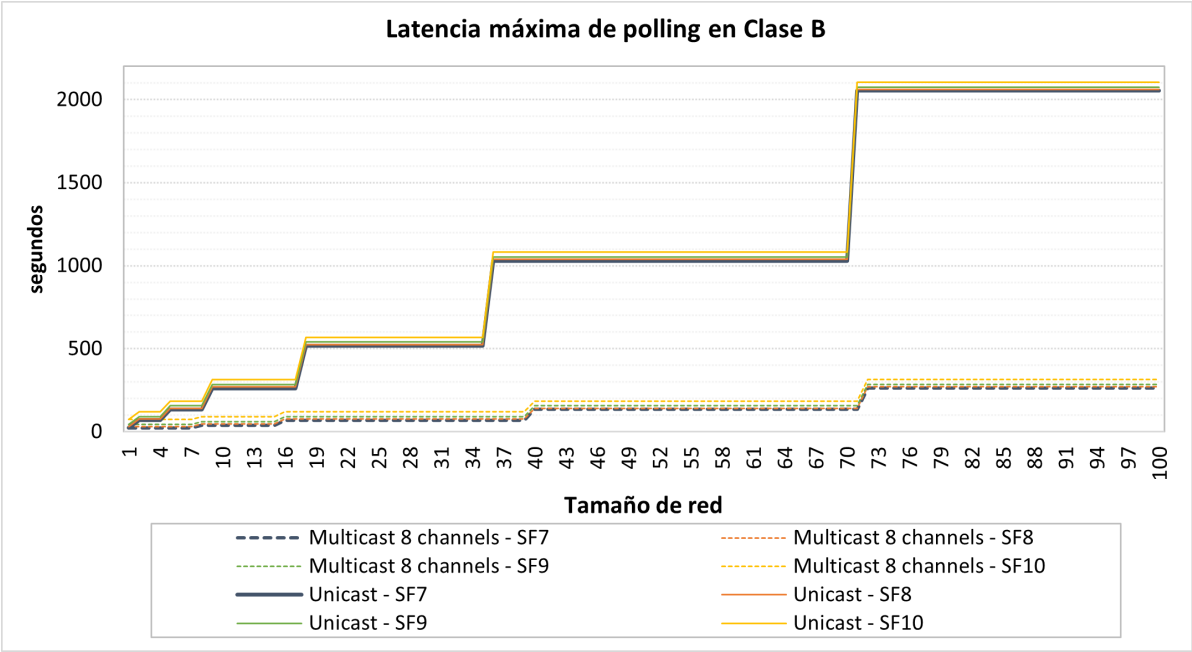


Figura 6.3: Latencia máxima para polling unicast y multicast (ocho canales) de Clase B en función del tamaño de la red

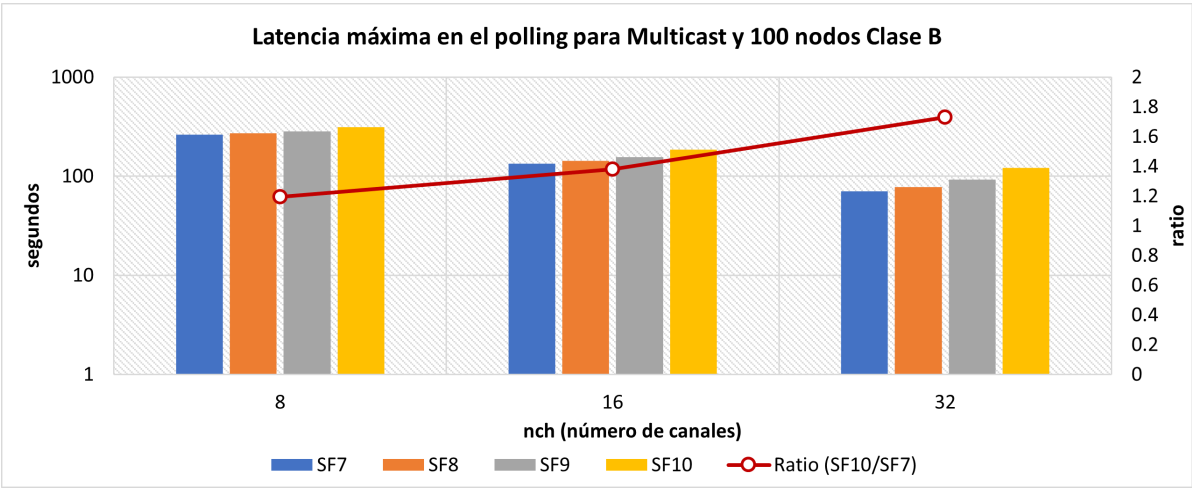


Figura 6.4: Impacto del número de canales en el retardo de polling para una red multicast de 100 nodos en Clase B

6.3 Diseño y resultados del planificador en clase C

Mediante el uso de nodos de Clase C se puede superar la sobrecarga de los mensajes de control de la Clase B y la aleatoriedad de la programación dentro de una ventana de baliza. Además, el período de polling se puede adaptar mejor al número exacto de nodos en la red, sin tener en cuenta los estrictos parámetros temporales de la Clase B, que requieren que los períodos de baliza sean potencias de dos. No obstante, cabe resaltar que en esta clase, al igual que con la Clase B, pueden producirse eventos de colisiones o falta de disponibilidad de recursos en el GW (ver figura 6.5), por lo que se requiere igualmente un planificador a medida.

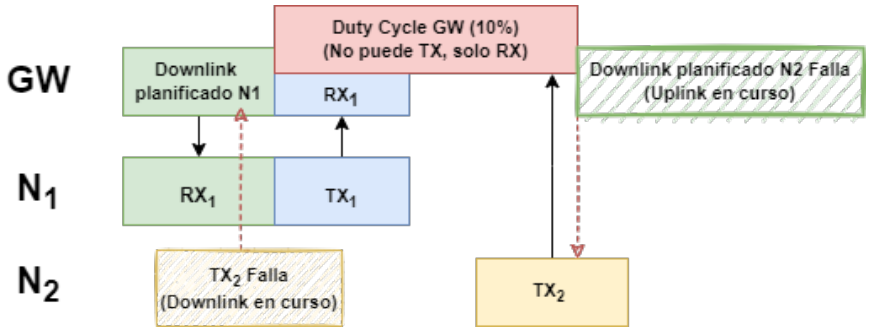


Figura 6.5: Eventos posibles durante la operativa en Clase C en el GW

Este modo de operación puede ser positivo para los nodos que se alimentan de la red eléctrica y, por lo tanto, no necesitan ahorrar batería durmiendo, lo que reduce los problemas de sincronización. El sistema de polling en Clase C sin estas restricciones se muestra en las figuras 6.6 y 6.7.

Los mecanismos de polling propuestos podrían utilizarse para implementar tiempos de reposo vía software en los nodos de Clase C, lo que ayudaría a ahorrar energía si fuera necesario, pero rompería la compatibilidad con la operación regular de la Clase C en caso de que se produzca un enlace descendente fuera del ámbito del sistema de polling. Esa es la razón principal por la que la Clase B sigue siendo interesante en términos de eficiencia energética.

Nuevamente, si los nodos y el GW tienen soporte multicast, se pueden sondear grupos de n_{ch} nodos simultáneamente y responder al mismo tiempo pero en n_{ch} canales diferentes. En la figura 6.7, el nodo n_{ch}+1 representa un nodo que no encaja en el primer grupo de n_{ch} dispositivos que se pueden sondear al mismo tiempo.

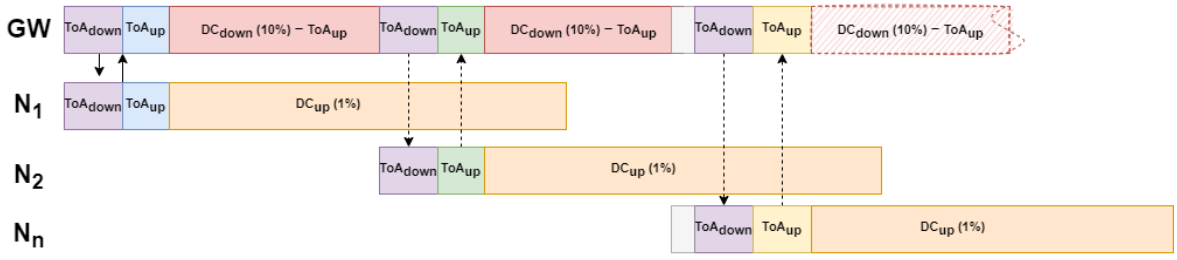


Figura 6.6: Polling en Clase C unicast

Si el tiempo de polling T_{poll} se define como el tiempo entre los mensajes de polling de enlace descendente desde la puerta de enlace a los nodos, se puede calcular como en la ecuación 6.2 para cualquier caso, de la siguiente manera:

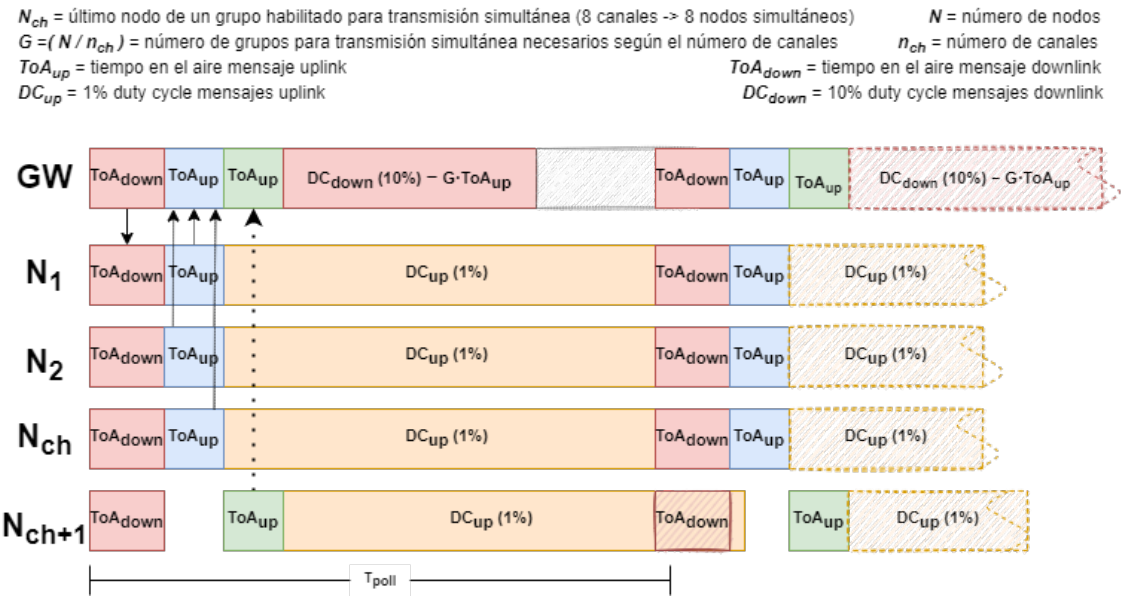


Figura 6.7: Polling en Clase C con soporte multicast

$$T_{poll} = \begin{cases} 10 \cdot ToA_{down} & , DC_{up} < G \cdot DC_{down} \\ 10 \cdot ToA_{up} & , DC_{up} \geq G \cdot DC_{down} \end{cases} \tag{6.2}$$

El comportamiento aleatorio en la asignación de ranuras de enlace descendente que se encuentra en la operación de Clase B no es un problema en este caso, por lo que los resultados de la figura 6.8 muestran la duración exacta en segundos del período de polling.

Debido a que no hay tiempos de inactividad posibles entre las ranuras programadas (como lo introduce el algoritmo de programación de Clase B), y no hay restricción en el período mínimo para garantizar la PDR, los períodos calculados no son discretos y muestran un aumento lineal proporcional al tamaño de la red.

También se puede observar que, para tamaños de red de más de 10 dispositivos, el impacto del SF en los mensajes de enlace ascendente no es relevante, ya que, como hay más nodos para sondear desde la puerta de enlace, los factores limitantes son el tiempo en el aire (ToA) y el ciclo de trabajo (DC) de la puerta de enlace.

En cuanto a los canales, el impacto de variar n_{ch} en este polling multicast en Clase C se muestra en la figura 6.9. En este caso, el impacto de usar más canales reduce en gran medida la latencia, siendo la reducción proporcional a la observada en la Clase B. Como la Clase C parte de latencias más bajas desde el principio, la solución de polling multicast de Clase C con n_{ch} de 32 es la configuración de recopilación de datos más rápida probada, logrando una latencia de 11 s, que puede considerarse lo suficientemente rápida para algunas aplicaciones críticas de IIoT, con sensores que tienen respuestas lentas, como temperatura o humedad, por ejemplo. La relación en latencia entre dispositivos con diferentes SF en función del número de canales disponibles es mayor que en el polling de Clase B, aunque disminuye cuando hay más canales disponibles.

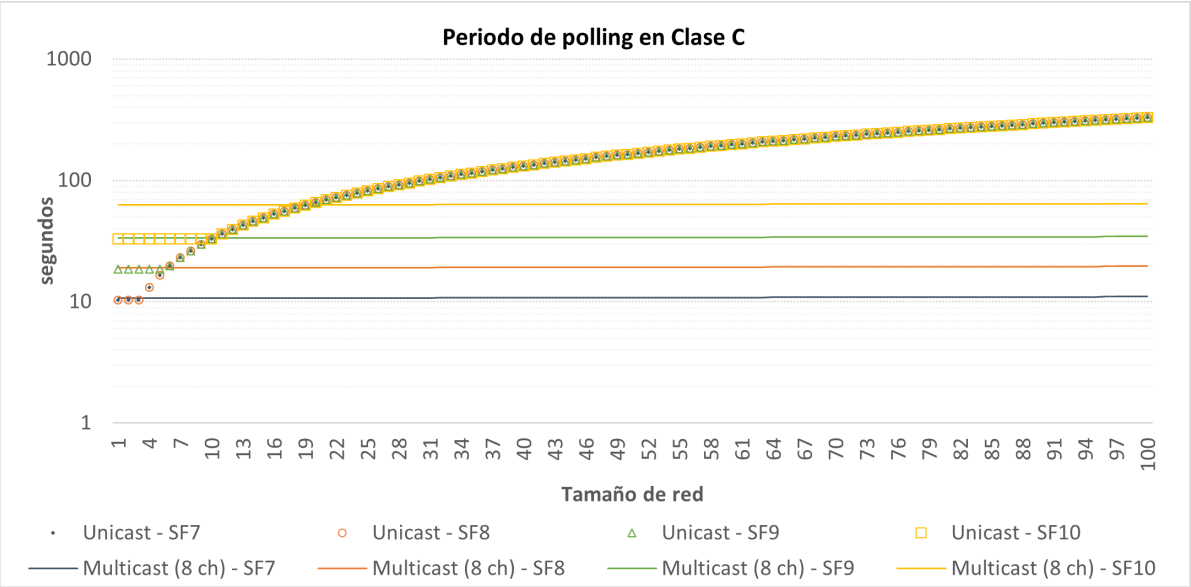


Figura 6.8: Período en segundos para polling unicast y multicast (ocho canales) de Clase C, en función del tamaño de la red

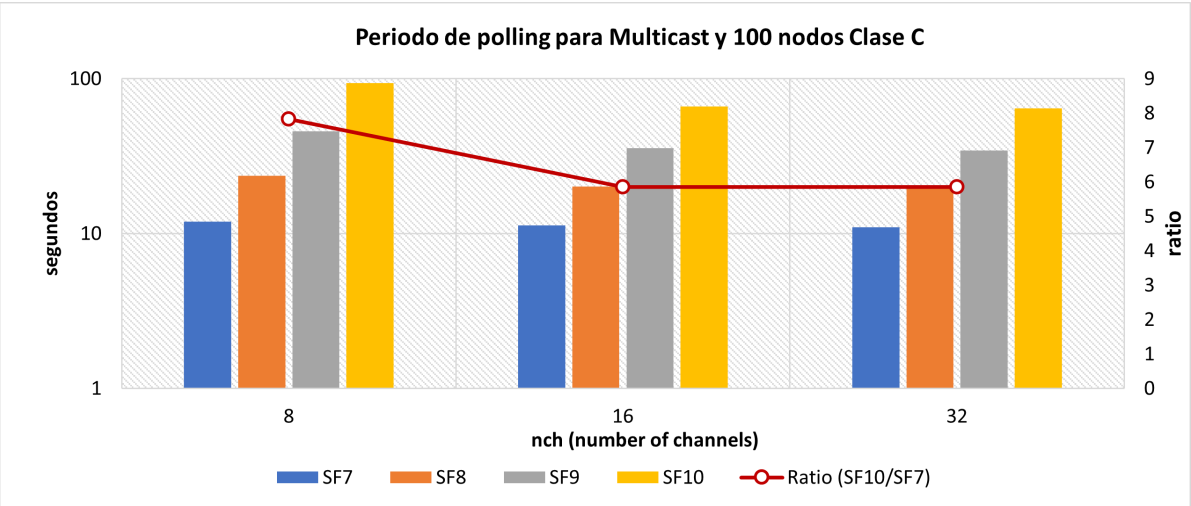


Figura 6.9: Impacto del número de canales en el retardo de polling para una red multicast de 100 nodos en Clase C

6.4 Análisis del Consumo Energético y Duración de la Batería en fases de Polling

En base a la capacidad de la batería seleccionada de 3000 mAh, la figura 6.10 muestra la vida útil operativa esperada de un nodo, dependiendo de la clase y el SF utilizado. Por un lado, como era de esperar, el polling de Clase C requiere mucha más energía porque la radio de los nodos está constantemente activa, lo que también significa que el uso de un SF o n_{ch} diferente no es relevante. Esto resulta en una duración de alrededor de 2 días, considerando solo el consumo de radio y CPU (la duración real dependerá del uso de sensores, pantalla, botones u otros componentes añadidos al dispositivo).

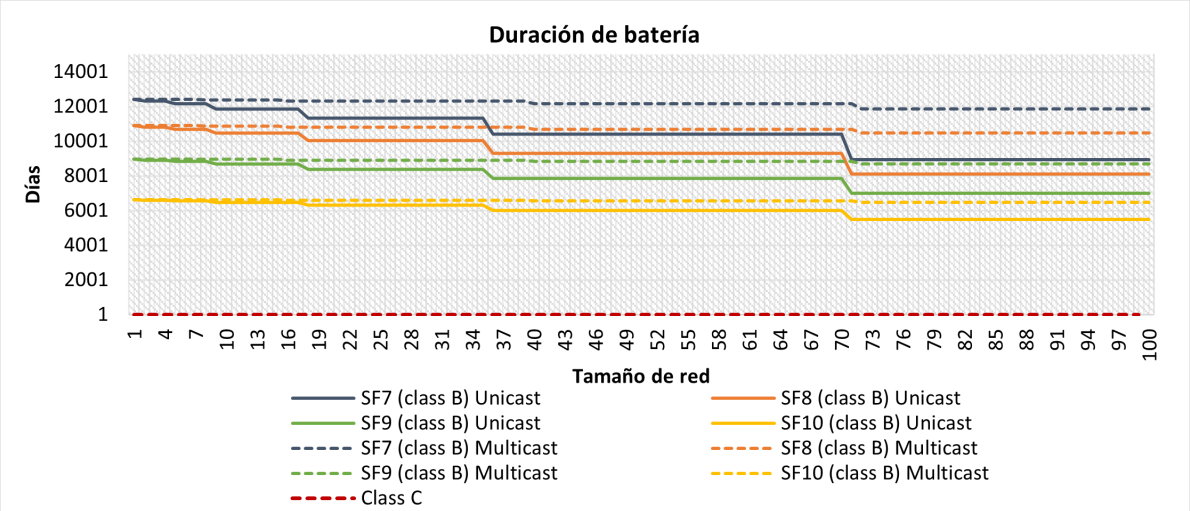


Figura 6.10: Duración de la batería en años para polling unicast y multicast (ocho canales) de Clase B, en función del tamaño de la red y el SF

Por otro lado, las posibles configuraciones en Clase B pueden traducirse en duraciones de batería de 15 a 34 años, valores que no son realistas debido a la energía consumida por otros componentes del dispositivo o incluso a la degradación natural de los materiales de la batería.

Como referencia, varios fabricantes de dispositivos especifican duraciones de batería de hasta 2 o 3 años cuando el tráfico de red es de alrededor de 24 paquetes de enlace ascendente por día en Clase A.

En resumen, el resultado relevante es la capacidad de extender drásticamente el tiempo de operación de un nodo mediante el uso de configuraciones de polling de Clase B, que pueden garantizar varios meses de servicio sin supervisión.

6.5 Análisis del Impacto de los Mecanismos de Polling en la Seguridad de las Redes LoRaWAN

En este apartado, se analiza cómo los mecanismos de polling propuestos pueden afectar la seguridad de una red LoRaWAN, considerando las soluciones de seguridad que ofrece el estándar de base.

La finalidad de implementar un sistema de polling es asemejar la captura de datos a los sistemas industriales legados, por lo que se requiere un nivel de seguridad crítico. Los más relevantes se pueden englobar en:

- Ataques de repetición: Un atacante podría capturar un mensaje de polling legítimo y repetirlo más tarde, lo que podría provocar acciones no deseadas en los dispositivos. Se discutirían mecanismos de protección, como el uso de nonces y marcas de tiempo en los mensajes de polling.

- Ataques de intermediario (Man-in-the-middle): Si no se implementan medidas de seguridad adecuadas, un atacante podría interceptar y modificar los mensajes de polling, comprometiendo la integridad de los datos. Se analizaría la importancia del cifrado de extremo a extremo y la autenticación mutua entre la puerta de enlace y los dispositivos.

Frente a estos ataques, existen una serie de medidas y buenas prácticas que permiten paliar y minimizar estas brechas de seguridad:

- Autenticación de dispositivos: LoRaWAN utiliza un sistema de autenticación mutua entre dispositivos y la red para garantizar que solo los dispositivos autorizados puedan unirse y comunicarse. Esto se logra mediante el uso de claves de sesión y AppKeys, que se almacenan de forma segura en los dispositivos y el servidor de red.

- Cifrado de extremo a extremo: LoRaWAN cifra los mensajes de extremo a extremo para proteger la confidencialidad de los datos. Se utilizan dos capas de cifrado: una para la carga útil del mensaje y otra para el encabezado. Esto garantiza que solo el dispositivo y el servidor de red puedan leer los datos.

- Gestión de claves: LoRaWAN implementa un sistema de gestión de claves que permite la generación, distribución y actualización segura de las claves utilizadas para la autenticación y el cifrado.

- Para protegerse LoRaWAN utiliza números de secuencia, contadores y timestamps en los mensajes para prevenir ataques de repetición. Al incluir estos campos en cada mensaje, se puede asegurar que el mensaje no ha sido capturado y repetido por un atacante.

- El polling, especialmente en Clase C, podría aumentar la vulnerabilidad a ataques de denegación de servicio (DoS). Un atacante podría enviar un gran número de solicitudes de polling falsas, saturando la red y evitando que los dispositivos legítimos transmitan datos. Las regulaciones del duty cycle en LoRaWAN limitan el tiempo que los dispositivos pueden transmitir, lo que dificulta la realización de ataques que intenten saturar la red con tráfico malicioso.

6.6 Conclusiones

A medida que las LPWAN se generalizan y aumenta su ancho de banda, el polling se convertirá en una opción más viable para recopilar datos de un gran número de dispositivos. Además, el desarrollo de nuevas técnicas para reducir la posible sobrecarga a causa del polling lo hará aún más eficiente.

Centrándose en el estándar LoRaWAN, hasta ahora, las aplicaciones se centraban principalmente en el tráfico de enlace ascendente. Intentar exportar el polling como mecanismo de adquisición de datos encuentra el desafío de optimizar el tráfico de enlace descendente, que se requiere para enviar los mensajes de polling a los nodos, al tiempo que se garantiza que los mensajes de enlace ascendente lleguen a tiempo. Esta optimización se vuelve más difícil cuando el tamaño de la red o la carga de tráfico pueden cambiar constantemente, con períodos en los que se conectan nuevos nodos y los nodos antiguos se quedan sin batería, se detectan eventos de alarma y se activan mensajes más frecuentes, por dar algunos ejemplos.

Para habilitar un sistema de polling sobre LoRaWAN que pueda adaptarse a estos requisitos y formas de operación, se propuso y probó la configuración de nodos con Clase B o Clase C, con cada opción con programación unicast o multicast. Los resultados obtenidos pueden ayudar a comprender los límites de esta tecnología en términos de latencia (o períodos de polling) para recopilar datos e información de la vida útil de la batería. Esta información permite al servidor de red organizar la red para cumplir con los diferentes requisitos de la aplicación: cuando la latencia no es una limitación estricta, el polling en Clase B ofrece la mejor compensación entre energía y latencia, lo que garantiza una alta PDR y muchos meses de funcionamiento, mientras que el polling en Clase C ofrece latencias más cortas inmejorables a costa de requerir alimentación de red o durar solo unos días, o menos, mientras está conectado.

La opción multicast muestra mejores resultados en general, como se esperaba; sin embargo, este estudio también considera las configuraciones unicast como una opción para dispositivos heredados u opciones de puerta de enlace más económicas (cuantos más canales disponibles en la interfaz, más caro es el dispositivo). En conclusión, la decisión entre LoRaWAN Clase B y Clase C depende de las demandas específicas de la aplicación y las consideraciones imperativas del consumo de energía. La Clase B se destaca como la opción óptima para escenarios donde la gestión meticulosa de la energía es primordial y las transmisiones de datos ocurren de forma intermitente. Su capacidad para programar ranuras de recepción garantiza un uso eficiente de los recursos energéticos, lo que la hace particularmente adecuada para aplicaciones como la monitorización remota, donde la generación de informes de datos periódicos es la norma.

Por otro lado, la Clase C emerge como la opción preferida en contextos donde la capacidad de respuesta instantánea tiene prioridad sobre la vida útil prolongada de la batería. Su capacidad de polling continuo facilita la comunicación en tiempo real, lo que la hace indispensable para aplicaciones que exigen baja latencia, como sistemas de seguridad y seguimiento dinámico de activos en entornos de ritmo rápido con tráfico de datos constantemente alto.

Una solución óptima para beneficiarse de ambas clases y modos de polling se basa en la posibilidad de cambiar de modo sobre la marcha. El servidor de red puede obligar a los nodos a operar en una clase u otra, dependiendo de las condiciones, cambiando entre Clase B y Clase C. En última instancia, la coexistencia de LoRaWAN Clase B y Clase C es un testimonio de la versatilidad del protocolo, lo que permite soluciones personalizadas basadas en los requisitos únicos de diversas aplicaciones de polling de IIoT. A medida que el panorama de IIoT continúa evolucionando, la selección sensata de clases LoRaWAN y mecanismos de polling jugará un

papel fundamental en la optimización del equilibrio entre la eficiencia energética y la capacidad de respuesta en tiempo real en el ámbito en evolución de la conectividad inalámbrica.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo final resume las contribuciones de la tesis, analizando el impacto de los mecanismos desarrollados, sus posibles implicaciones técnico-económicas para la industria, y propone las líneas de investigación que darán continuidad a este trabajo.

7.1 Resumen de las contribuciones principales

El objetivo central de esta tesis ha sido superar las limitaciones de las redes LoRaWAN estándar para consolidarlas como una solución de comunicación robusta, eficiente y escalable para el IIoT. Para lograrlo, la investigación ha generado contribuciones en algoritmos de comunicación, planificación de red y herramientas de software:

- Optimización del Enlace Descendente (DROB): Se ha desarrollado el mecanismo Data Rate Optimization for class B (DROB). A diferencia del ADR estándar, DROB permite al gateway ajustar dinámicamente los parámetros de transmisión hacia cada nodo, mejorando la robustez del enlace en entornos con condiciones de radiofrecuencia variables y ruidosos.

- Planificación de Red para la Escalabilidad (ABPC): Se ha propuesto el Adaptive Beacon Period Configurator (ABPC), una solución que combina un algoritmo de planificación con un modelo analítico del comportamiento de la cola del gateway. Este modelo permite predecir el rendimiento de la red (PDR, retardo) en función de su tamaño y configuración, dotando al sistema de la capacidad de tomar decisiones informadas para garantizar los requisitos de QoS.

- Habilitación de Sistemas de Adquisición de Datos (Polling): Se han diseñado y analizado sistemas de polling sobre LoRaWAN en Clase B y C. Esto permite implementar un paradigma de adquisición de datos determinista, similar a los sistemas industriales tradicionales, pero sobre una tecnología LPWAN.

- Herramientas de Soporte al Despliegue y Operación (LIMA y PSILO): Para trasladar los mecanismos teóricos a la práctica, se han desarrollado dos herramientas de software,

LIMA y PSILO, que constituyen una contribución práctica relevante de esta tesis. Estas aplicaciones, cuyo diseño y funcionamiento se detallan en el Apéndice A, facilitan la planificación, el despliegue y la operación de redes LoRaWAN en entornos industriales.

7.2 Análisis de resultados y validación Cuantitativa

La efectividad de los mecanismos ha sido validada mediante simulaciones exhaustivas. La siguiente tabla resume los hallazgos más destacados:

Tabla 7.1: Análisis cuantitativo del rendimiento de los mecanismos propuestos en escenarios clave.

Mecanismo	**Métrica Clave**	**Escenario**	**Resultado Obtenido**	**Resultado Referencia**	**Beneficio**
DROB	Nodos con Calidad de Servicio Deficiente (PDR < 75%)	Red de 200 nodos bajo alta interferencia durante 1 hora.	25 nodos	129 nodos (con DR5 Fijo)	Reducción del 80% en el número de nodos que experimentan un mal rendimiento bajo condiciones de estrés.
ABPC	Consumo Energético Medio por Nodo	Red de 64 nodos, priorizando la máxima autonomía sobre la latencia.	~5 mAh (con W1024)	~18 mAh (Estándar W128)	Reducción del consumo energético en un 72%.
Polling	Capacidad de Sondeo (Baja Latencia)	Red multicast (8 canales) con el requisito de mantener la latencia de sondeo por debajo de 1 minuto.	~65 nodos/min (Clase C)	~35 nodos/min (Clase B)	Duplica la capacidad de la red para sondeos de respuesta rápida, esencial en aplicaciones críticas.
Polling	Autonomía del Dispositivo (Larga Duración)	Red multicast de 100 nodos en operación continua de sondeo.	> 15 años (teórico, con Clase B)	< 3 días (Clase C)	Permite despliegues autónomos de muy larga duración, una capacidad inviable con la operación continua de Clase C.

7.3 Impacto técnico y económico para la Industria

Las mejoras cuantificadas se traducen en un impacto directo para la adopción de tecnologías IIoT.

Impacto Técnico:

La principal consecuencia es conseguir acercar LoRaWAN a una tecnología de grado industrial. La fiabilidad mejorada permite su uso en un amplio catálogo de aplicaciones de control y monitorización de procesos en industria. La flexibilidad de los mecanismos adaptativos facilita el despliegue de redes heterogéneas y dinámicas, reduciendo la necesidad de una planificación manual rígida.

Impacto Económico:

- Reducción de Costes Operativos (OpEx): El aumento de la autonomía de las baterías minimiza la necesidad de reemplazos, uno de los mayores costes en despliegues IoT a gran escala.

- Optimización de la Inversión (CapEx): Al permitir que un solo gateway gestione más dispositivos sin perder fiabilidad, se optimiza la densidad de la red, reduciendo la cantidad de infraestructura necesaria.

- Aceleración del Despliegue: Las herramientas de software descritas en el Apéndice A, LIMA y PSILO, impactan directamente en la fase de planificación. La capacidad de LIMA para simular la cobertura de manera virtual reduce drásticamente el tiempo y los costes asociados a los estudios de campo (site surveys). Por su parte, PSILO simplifica la operación de la red al automatizar tareas complejas, reduciendo la necesidad de personal técnico especializado.

7.4 Propuesta de arquitectura y líneas de trabajo futuro

Los mecanismos desarrollados, hasta ahora analizados en el marco de una red con un solo gateway, pueden ser integrados en una arquitectura de red más avanzada. Se propone, por tanto, un planificador unificado que opere a nivel de red para orquestar los mecanismos DROB y ABPC en un entorno con múltiples gateways (véase la figura 7.1).

Este planificador, cuyo diagrama de bloques se detalla en la figura 7.2, se situaría entre el Servidor de Red y el Servidor de Aplicación. Su función sería supervisar la red completa, recibir requisitos de Calidad de Servicio (QoS) del operario y asignar de forma inteligente los recursos del gateway más adecuado para cada grupo de nodos.

El objetivo sería integrar todos los mecanismos y herramientas propuestas con un planificador que opere entre el NS y el AS (o paralelo al NS), que sea capaz, por tanto, de supervisar toda la red de nodos y GWs, y que además reciba configuraciones del operario sobre requisitos de QoS específicos.

Esta parametrización y configuración de la red desde el punto de vista del gestor del sistema puede integrarse en las herramientas de interfaz de usuario para planificación y despliegue de redes propuestas.

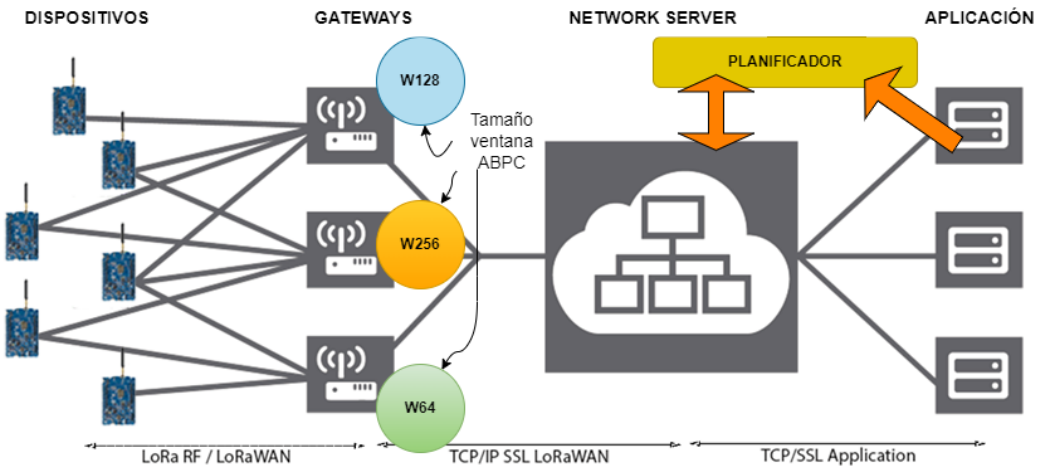


Figura 7.1: Diagrama de red con planificador y varios Gateways

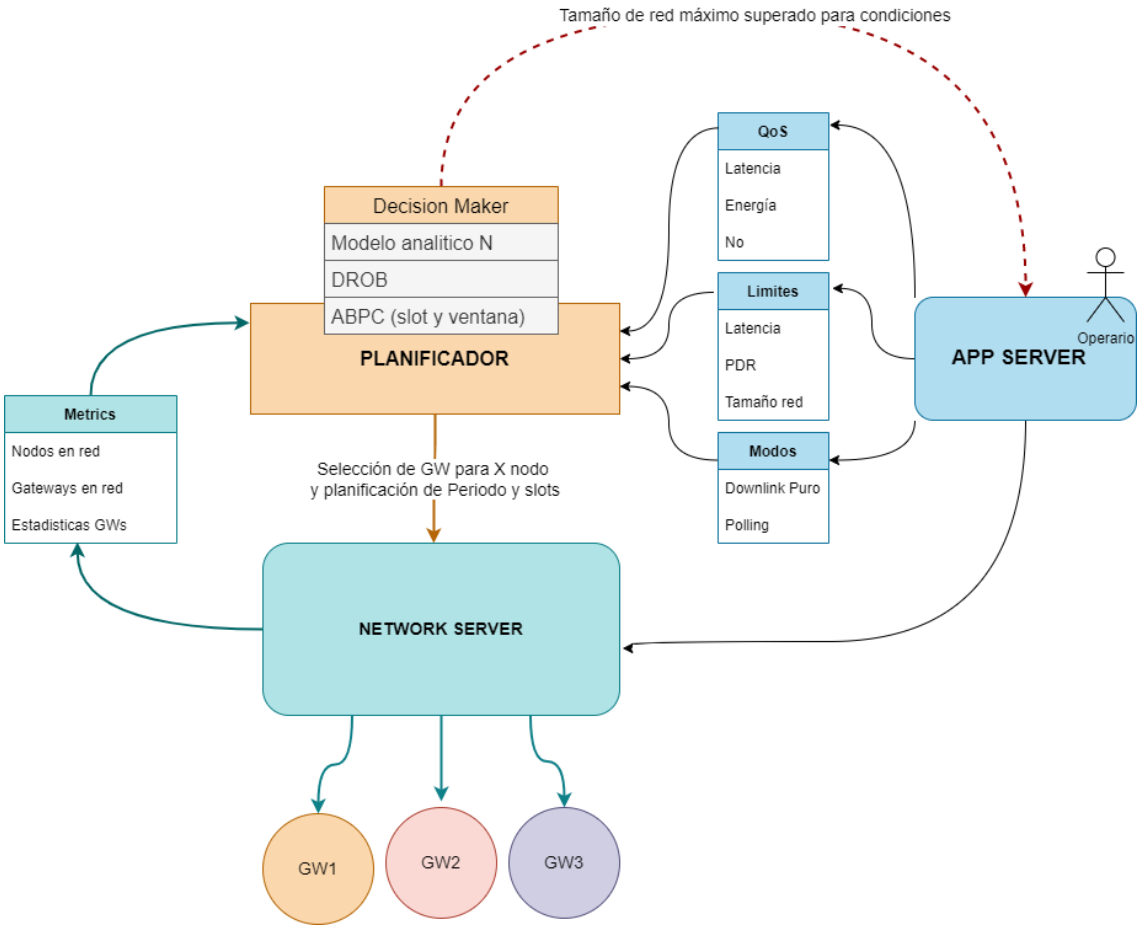


Figura 7.2: Diagrama de bloques del planificador de red

Estas ya cuentan con la implementación que soporta el modo polling, mientras que los mecanismos de DROB y ABPC funcionan directamente sobre el network server de forma autónoma.

La lógica de enrutamiento de paquetes downlink a los gateways asignados se puede realizar mediante una correlación de identificadores de nodos con su grupo de QoS escogido por el usuario.

Partiendo de esta arquitectura, las líneas de trabajo futuro se centran en expandir la escalabilidad y la versatilidad de las soluciones presentadas:

- Escalabilidad en redes con múltiples gateways: Es fundamental investigar la escalabilidad de las soluciones en redes con varias puertas de enlace, abordando desafíos como la gestión de la interferencia entre celdas y la optimización del enrutamiento.

- Adaptación a topologías de red avanzadas: Con la reciente evolución del estándar, es crucial adaptar los algoritmos a las nuevas topologías multisalto (multihop), como las que habilita la funcionalidad Relay ([61]). Esto sentaría las bases para la investigación en Redes Tolerantes al Retardo (DTN) y la integración con Redes no Terrestres (NTN) [62]), como las de comunicación Directa a Satélite (DTS) [63].

- Integración de nuevas capacidades de hardware e IA: Se debe explorar el potencial de las nuevas características de hardware (SF dual, banda de 2.4 GHz, en versiones recientes del hardware ofrecido por Semtech) y la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial para que el planificador de red pueda tomar decisiones de optimización de forma autónoma.

7.5 Conclusión Final

Esta tesis ha contribuido al desarrollo de un ecosistema de soluciones que mejoran de forma tangible la eficiencia, robustez y escalabilidad de las redes LoRaWAN. Los resultados demuestran que, mediante una gestión inteligente de los recursos, es posible superar las limitaciones inherentes del protocolo y habilitarlo para un amplio espectro de aplicaciones críticas en el ámbito del IIoT.

Los mecanismos, configuraciones, metodología y herramientas propuestas conllevan una reducción directa de costes de operación y despliegue, habilitando nuevos sistemas de monitorización y control más versátiles y escalables.

Las líneas futuras propuestas prometen seguir evolucionando sobre esta base, consolidando a LoRaWAN como una tecnología de comunicación fundamental para el presente y futuro del IIoT.

Bibliografía

[1] HMS Networks. *HMS Networks presents the annual analysis of the industrial network market*. Inf. téc. Accessed on: August 5, 2025. HMS Networks, mayo de 2023 (vid. pág. 2).

[2] Zion Market Research. *Low Power Wide Area Network (LPWAN) Market Size, Share, Growth, and Forecast, 2024-2032*. Inf. téc. ZMR/23/2138. Accessed on: August 5, 2025. Zion Market Research, jul. de 2023 (vid. pág. 2).

[3] Arshad Farhad y col. «Deep Learning-Based Channel Adaptive Resource Allocation in LoRaWAN». En: *2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. 2018, págs. 366-369. DOI: 10.1109/ICUFN.2018.8436878 (vid. pág. 9).

[4] Rohde & Schwarz. *NB-IoT Technology Introduction*. https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf. Application Note. 2017 (vid. pág. 11).

[5] Juan García-Martín y Antonio Torralba. «Model of a Device-Level Combined Wireless Network Based on NB-IoT and IEEE 802.15.4 Standards for Low-Power Applications in a Diverse IoT Framework». En: *Sensors* 21 (mayo de 2021), pág. 3718. DOI: 10.3390/s21113718 (vid. pág. 12).

[6] Sigfox. *Sigfox Technical Overview*. https://www.ismac-nc.net/wp/wp-content/uploads/2017/08/sigfoxtechnicaloverviewjuly2017-170802084218.pdf. Jul. de 2017 (vid. págs. 12, 14).

[7] LoRa Alliance. *LoRaWAN Link-Layer Specification v1.1.0*. 2017 (vid. pág. 17).

[8] Semtech. *LoRa Modulation Basics*. https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf. Application Note AN1200.22. 2015 (vid. pág. 18).

[9] LoRa Alliance. *FUOTA Process Summmary v1.0.0*. https://resources.lora-alliance.org/technical-recommendations/fuota-process-summary-technical-recommendation-tr002-v1-0-0. 2019 (vid. pág. 18).

[10] LoRa Alliance. *LoRaWAN 1.1 Specification*. https://net868.ru/assets/pdf/LoRaWAN-v1.1.pdf. Accessed on: Mar. 7, 2023. 2017 (vid. págs. 20, 25).

[11] LoRa Alliance. *LoRaWAN 1.1 Regional Parameters rev A*. 2017 (vid. pág. 21).

[12] LoRa Alliance. *LoRaWAN Backend Interfaces Specification v1.1.0*. 2020 (vid. pág. 26).

[13] Duc-Anh Ta y col. «LoRa-MAB: A Flexible Simulator for Decentralized Learning Resource Allocation in IoT Networks». En: *2019 12th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*. IEEE. 2019, págs. 1-8 (vid. pág. 36).

[14] Joseph Finnegan, Stephen Brown y Ronan Farrell. «Evaluating the Scalability of LoRaWAN Gateways for Class B Communication in ns-3». En: *2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. IEEE. 2018, págs. 1-6 (vid. págs. 36, 79).

[15] Hongguang Li y col. «Measurement and Characterization of Electromagnetic Noise in Edge Computing Networks for the Industrial Internet of Things». En: *Sensors* 19.14 (2019), pág. 3104 (vid. págs. 41, 46).

[16] Michele Luvisotto y col. «On the Use of LoRaWAN for Indoor Industrial IoT Applications». En: *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018 (2018) (vid. pág. 41).

[17] H. T. Friis. «A Note on a Simple Transmission Formula». En: *Proceedings of the IRE* 34.5 (1946), págs. 254-256. DOI: 10.1109/JRPROC.1946.234568 (vid. pág. 43).

[18] Shengyang Li, Usman Raza y Aftab Khan. «How Agile is the Adaptive Data Rate Mechanism of LoRaWAN?» En: *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE. 2018, págs. 1-6 (vid. pág. 50).

[19] Rangarirai Kufakunesu, Gerhard P. Hancke y Adnan M. Abu-Mahfouz. «A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges». En: *Sensors* 20.18 (2020), pág. 5044. DOI: 10.3390/s20185044 (vid. pág. 50).

[20] Khaled Q. Abdelfadeel, Valentin Cionca y Dirk Pesch. «Fair Adaptive Data Rate Allocation and Power Control in LoRaWAN». En: *2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*. IEEE. 2018, págs. 1-2 (vid. pág. 50).

[21] Elena Sisinni y col. «A new LoRaWAN adaptive strategy for smart metering applications». En: *Computer Communications* 151 (2020), págs. 521-531 (vid. pág. 50).

[22] Carlos F. Dias, Eduardo R. de Lima y Gabriel Fraidenraich. «Bit Error Rate Closed-Form Expressions for LoRa Systems under Nakagami and Rice Fading Channels». En: *Sensors* 19.20 (2019), pág. 4412 (vid. pág. 50).

[23] Holger Linka y col. «Path Loss Models for Low-Power Wide-Area Networks: Experimental Results using LoRa». En: *Proceedings of the VDE ITG-Fachbericht Mobilkommunikation*. 2018 (vid. pág. 50).

[24] Sungryul Kim y Younghwan Yoo. «Contention-Aware Adaptive Data Rate for Throughput Optimization in LoRaWAN». En: *Sensors* 18.6 (2018), pág. 1716 (vid. pág. 50).

[25] Anna Triantafyllou y col. «Leveraging fairness in LoRaWAN: A novel scheduling scheme for collision avoidance». En: *Computer Networks* 186 (2021), pág. 107735 (vid. pág. 50).

[26] Arshad Farhad y col. «Deep Learning-Based Channel Adaptive Resource Allocation in LoRaWAN». En: *2022 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*. 2022, págs. 1-5. DOI: 10.1109/ICEIC54506.2022.9748580 (vid. pág. 50).

[27] Yousef A. Al-Gumaei y col. «A Novel Approach to Improve the Adaptive-Data-Rate Scheme for IoT LoRaWAN». En: *Electronics* 11.21 (2022), pág. 3521. DOI: 10.3390/electronics11213521 (vid. pág. 50).

[28] Zero Defect Manufacturing Platform Project. *Zero Defect Manufacturing Platform Project*. https://www.zdmp.eu/. Accessed on: Mar. 7, 2023. 2021. DOI: 10.3030/825631 (vid. pág. 78).

[29] Press release. *KPN activates Class B to level up its LoRaWAN network with groundbreaking capabilities*. https://www.actility.com/kpn-activates-class-b-to-level-up-its-lorawan-network/. Accessed on: Mar. 7, 2023. Ene. de 2022 (vid. pág. 78).

[30] K. Mikhaylov, J. Petäjärvi y A. Pouttu. «Effect of Downlink Traffic on Performance of LoRaWAN LPWA Networks: Empirical Study». En: *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/PIMRC.2018.8580721 (vid. pág. 78).

[31] J. P. Shanmuga Sundaram, Wenjia Du y Zhijun Zhao. «A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues». En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.1 (2020), págs. 371-388. DOI: 10.1109/COMST.2019.2949598 (vid. pág. 78).

[32] M.A.M. Almuhaya y col. «A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions». En: *Electronics* 11.1 (ene. de 2022), pág. 164. DOI: 10.3390/electronics11010164 (vid. pág. 78).

[33] Ali Hussein Jebril y Rusydiah Azni Rashid. «A systematic literature review on downlink frames in LoRaWAN». En: *Computers and Electrical Engineering* 101 (2022), pág. 108006 (vid. pág. 78).

[34] Alexandru I. Pop y col. «Does Bidirectional Traffic Do More Harm Than Good in LoRaWAN Based LPWA Networks?» En: *arXiv preprint arXiv:1704.04174* (2017) (vid. pág. 79).

[35] Jean M. Marais, Adnan M. Abu-Mahfouz y Gerhard P. Hancke. «A Survey on the Viability of Confirmed Traffic in a LoRaWAN». En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 9296-9311 (vid. pág. 79).

[36] Ihsan Ameer, K. I-Kai Wang y Zoran Salcic. «Application-aware adaptive parameter control for LoRaWAN». En: *Journal of Parallel and Distributed Computing* 166 (2022), págs. 166-177. DOI: 10.1016/j.jpdc.2022.04.023 (vid. pág. 79).

[37] Dimitrios Zorbas. «Improving LoRaWAN downlink performance in the EU868 spectrum». En: *Computer Communications* 195 (2022), págs. 303-314 (vid. pág. 79).

[38] Michele Pasetti y col. «Evaluation of the Use of Class B LoRaWAN for the Coordination of Distributed Interface Protection Systems in Smart Grids». En: *Journal of Sensor and Actuator Networks* 9.1 (2020), pág. 13 (vid. pág. 79).

[39] Charbel Zaraket, Ioannis Dogas y Dimitrios Kalyvas. «Open source LoRaWAN telemetry test bench for smart grid–A DLMS/COSEM implementation case study». En: *AIP Conference Proceedings* 2437.1 (2022), pág. 020044 (vid. pág. 79).

[40] Giulia Scaramella, Guilherme Cabral Heck, Luiz Claudio Lippmann Junior y col. «Enabling LoRaWAN Communication Over Wi-SUN Smart Grid Networks». En: *IEEE International Conference on Communications*. IEEE. 2022, págs. 4842-4847 (vid. pág. 79).

[41] Dae-Young Kim, Jihoon Park y Seokhoon Kim. «Data Transmission in Backscatter IoT Networks for Smart City Applications». En: *Journal of Sensors* 2022 (2022) (vid. pág. 79).

[42] D. Zorbas y X. Fafoutis. «Time-Slotted LoRa Networks: Design Considerations, Implementations, and Perspectives». En: *IEEE Internet of Things Magazine* 4.1 (mar. de 2021), págs. 84-89. DOI: 10.1109/IOTM.0001.2000072 (vid. pág. 79).

[43] Hela Elbsir y col. «Evaluation of LoRaWAN Class B efficiency for downlink traffic». En: *16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. IEEE. 2020, págs. 105-110 (vid. pág. 79).

[44] Brecht Reynders y col. «Improving Reliability and Scalability of LoRaWANs Through Lightweight Scheduling». En: *IEEE Internet of Things Journal* 5.3 (2018), págs. 1830-1842 (vid. pág. 79).

[45] Vincent Di Vincenzo, Matthieu Heusse y Bruno Tourancheau. «Improving Downlink Scalability in LoRaWAN». En: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE. 2019, págs. 1-7 (vid. pág. 79).

[46] D. Ron y col. «Performance Analysis and Optimization of Downlink Transmission in LoRaWAN Class B Mode». En: *IEEE Internet of Things Journal* 7.8 (ago. de 2020), págs. 7836-7847. DOI: 10.1109/IOT.2020.2994958 (vid. pág. 79).

[47] Hela Elbsir y col. «Evaluation of LoRaWAN class B performances and its optimization for better support of actuators». En: *Computer Communications* 198 (2023), págs. 128-139 (vid. pág. 79).

[48] Cristina Garrido-Hidalgo y col. «LoRaWAN Scheduling: From Concept to Implementation». En: *2021 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Vol. 1. IEEE. 2021, págs. 392-399 (vid. pág. 79).

[49] Hyunchul Oh, Jin-Kyu Lee y Chang-Ki Kim. «TRILO: A Traffic Indication-Based Downlink Communication Protocol for LoRaWAN». En: *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018 (2018) (vid. pág. 79).

[50] Jaturong Samuhasilp y Wuttiwat Pora. «Development of an Automatic Meter Reading and Outage Management System using LoRaWAN Technology». En: *2018 IEEE 5th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*. IEEE. 2018, págs. 1-4 (vid. pág. 79).

[51] S. Brooks. «Markov chain Monte Carlo method and its application». En: *Journal of the Royal Statistical Society* (ene. de 2002). DOI: 10.1111/1467-9884.00117 (vid. pág. 85).

[52] David Todolí-Ferrandis, Javier Silvestre-Blanes y Víctor Sempere-Paya. «Robust Downlink Mechanism for Industrial Internet of Things Using LoRaWAN Networks». En: *Electronics* 10.17 (2021), pág. 2122. DOI: 10.3390/electronics10172122 (vid. pág. 91).

[53] Malik Al-Mefleh y Omar Al-Kofahi. «Frequency-domain contention and polling MAC protocols in IEEE 802.11 wireless networks: A survey». En: *Journal of Network and Computer Applications* 103 (2018), págs. 1-17 (vid. pág. 100).

[54] Federico Tramarin y Stefano Vitturi. «A dynamic rate selection algorithm for IEEE 802.11 industrial wireless LAN». En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 13.2 (2017), págs. 688-697 (vid. pág. 100).

[55] Xiaoyu Xu y col. «Towards Critical Industrial Wireless Control: Prototype Implementation and Experimental Evaluation on URLLC». En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 19.4 (2023), págs. 4332-4341 (vid. pág. 100).

[56] Julius von Hoyningen-Huene y Jens Mueller. «Scheduling acyclic traffic in cyclic and deterministic communication systems». En: *2017 IEEE 13th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. IEEE. 2017, págs. 1-9 (vid. pág. 100).

[57] Ming Zheng y col. «A priority-aware frequency domain polling MAC protocol for OFDMA-based networks in cyber-physical systems». En: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2015.1 (2015), págs. 1-14 (vid. pág. 100).

[58] Yuichi Igarashi, Ryo Nakano y Naoki Wakamiya. «A Polling-Based Transmission Scheme Using a Network Traffic Uniformity Metric for Industrial IoT Applications». En: *Sensors* 19.1 (2019), pág. 187. DOI: 10.3390/s19010187 (vid. pág. 101).

[59] Eloy Vicente-Tavera y col. «AlLoRa: Empowering environmental intelligence through an advanced LoRa-based IoT solution». En: *Sensors and Actuators A: Physical* 364 (2023), pág. 114841. DOI: 10.1016/j.sna.2023.114841 (vid. pág. 101).

[60] David Todoli-Ferrandis y col. «Adaptive Beacon Period Configurator for Scalable LoRaWAN Downlink Applications». En: *IEEE Access* 11 (2023), págs. 83627-83638 (vid. pág. 102).

[61] LoRa Alliance. *Relay v1.0.1*. 2024 (vid. pág. 120).

[62] LoRa Alliance. *NTN LoRaWAN: IoT Satellites*. Mar. de 2025 (vid. pág. 120).

[63] Muhammad Asad Ullah, Konstantin Mikhaylov e Hirley Alves. «Analysis and Simulation of LoRaWAN LR-FHSS for Direct-to-Satellite Scenario». En: *IEEE Wireless Communications Letters* 11.3 (2022), págs. 548-552. DOI: 10.1109/LWC.2021.3135984 (vid. pág. 120).

[64] Roger Coudé. *Radio Mobile*. http://www.radiomobile.pe1mew.nl/. Software de simulación de propagación de radiofrecuencia. 2024 (vid. pág. 134).

[65] Nespra. *Nespra LoRaWAN Analyzer Tool*. https://help.nespra.net/hc/es/articles/4416159601811-LoRaWAN-Analyzer-Tool. Herramienta de analisis para el trafico y calidad de señales LoRaWAN. 2024 (vid. pág. 134).

[66] Adeunis. *Adeunis LoRaWAN Coverage Meters*. https://www.adeunis.com/en/radio-mapping-iot-network/. Medidores de cobertura LoRaWAN para pruebas de campo. 2024 (vid. pág. 134).

[67] RAKwireless. *RAKwireless LoRaWAN Coverage Meters*. https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisnode/rak10701-p/datasheet/. Medidores de cobertura LoRaWAN portatiles para pruebas de campo. 2024 (vid. pág. 134).

[68] L. M. Bartolín-Arnau y col. «LoRaWAN Networks for Smart Applications in Rural Settings». En: *IETE Technical Review* 40.5 (2023), págs. 440-452 (vid. pág. 138).

[69] L. M. Bartolín-Arnau y col. «Hybrid solution for smart rural applications in areas without internet coverage». En: *International Journal of Sensor Networks* 40.4 (2022), págs. 250-261 (vid. pág. 138).

Apéndice A

Herramientas de planificación para despliegues en industria

A.1 Introducción

Los mecanismos de optimización y los modelos analíticos desarrollados en los capítulos anteriores demuestran mejoras cuantitativas en el rendimiento de las redes LoRaWAN. Sin embargo, para que estas mejoras se materialicen en despliegues reales, es imprescindible contar con herramientas prácticas que faciliten al personal técnico la planificación, el despliegue y la gestión de la red.

El despliegue de redes LoRaWAN en entornos industriales presenta desafíos únicos, especialmente en interiores, donde la propagación de la señal es compleja y las condiciones de ruido son muy variables. Las herramientas de planificación convencionales, a menudo centradas en escenarios exteriores, no suelen ofrecer la granularidad necesaria para garantizar una cobertura robusta y fiable en estos entornos.

Para solventar esta carencia, este trabajo incluye el desarrollo de una suite de software de apoyo diseñada específicamente para la industria. Estas herramientas no solo validan las contribuciones algorítmicas de la tesis, sino que constituyen una aportación en sí mismas, al reducir la complejidad y los costes asociados a la puesta en marcha de una red LoRaWAN industrial.

Este capítulo presenta estas dos herramientas complementarias:

- LIMA (LoRaWAN Indoor Mapper): Una herramienta para el análisis y la planificación de la cobertura en interiores, que permite optimizar el diseño de la red antes del despliegue físico.
- PSILO (Polling System for LoRaWAN): Una plataforma para la orquestación y gestión inteligente de la red, que implementa los mecanismos de sondeo (polling) y multicast para optimizar la adquisición de datos y la operación de la red.

Finalmente, una vez descritas ambas herramientas, se propondrá una metodología de despliegue integral que estructura el uso de LIMA y PSILO en un proceso coherente y eficaz.

A.2 LoRaWAN Indoor Mapper: LIMA

La herramienta de apoyo al despliegue en interiores de redes LoRaWAN, denominada LIMA (LoRaWAN Indoor MApper) que se presenta en este capítulo se destaca por su capacidad de análisis de cobertura y redundancia en entornos interiores, un aspecto crucial para garantizar la fiabilidad y el rendimiento de las redes en estos escenarios.

A diferencia de las herramientas convencionales que se basan en el RSSI como principal indicador de cobertura, esta herramienta adopta un enfoque más preciso y completo que considera las particularidades de la propagación en interiores.

Además, la herramienta analiza la redundancia de la red, un factor crítico en entornos industriales donde la fiabilidad de la comunicación es esencial. La redundancia se evalúa considerando la cobertura de múltiples puertas de enlace, garantizando que los dispositivos mantengan la conectividad incluso en caso de fallo de alguna de ellas.

La herramienta permite simular el impacto de diferentes configuraciones de red, incluyendo la variación de los SF, la topología de la red y la ubicación de los dispositivos. Esta funcionalidad permite al usuario experimentar y analizar el rendimiento de la red bajo diferentes condiciones, optimizando la configuración para lograr la mejor cobertura, calidad de servicio y eficiencia energética.

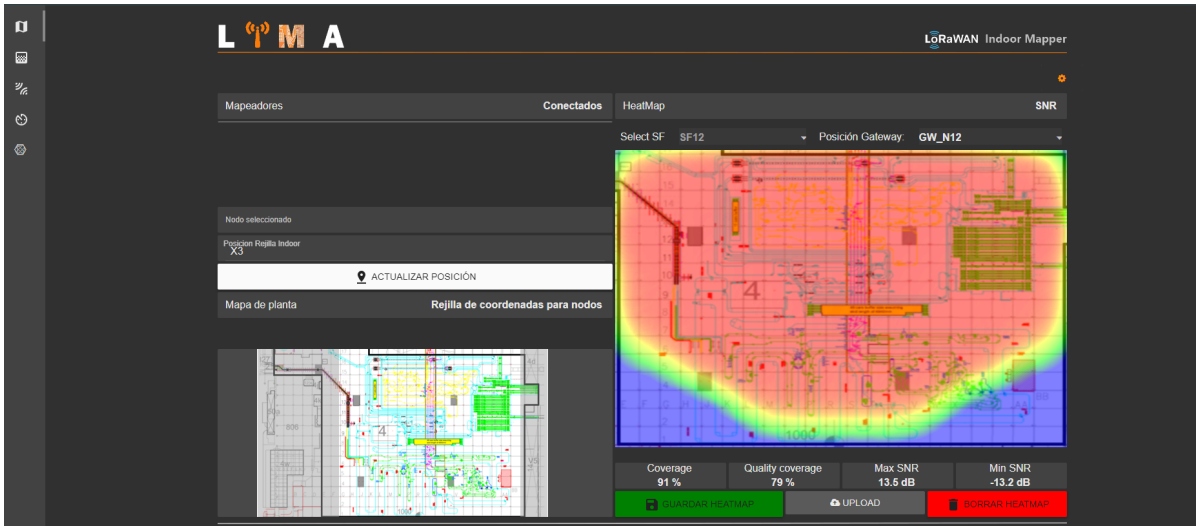


Figura A.1: Captura de herramienta web para planificación de despliegues indoor

En lugar de depender únicamente del RSSI, que puede ser afectado por el ruido ambiental y no siempre refleja con precisión la calidad de la señal, la herramienta utiliza la Relación Señal-Ruido (SNR) como principal indicador de cobertura. La SNR proporciona una medida más fiable de la calidad de la señal recibida, ya que considera la potencia de la señal en relación con el nivel de ruido. Además, la SNR en LoRaWAN está directamente relacionada con el Factor de Extensión (SF) que se utilizará para la comunicación, lo que permite a la herramienta predecir el SF que seleccionará el mecanismo ADR y, por lo tanto, estimar la tasa de datos y el alcance de la comunicación.

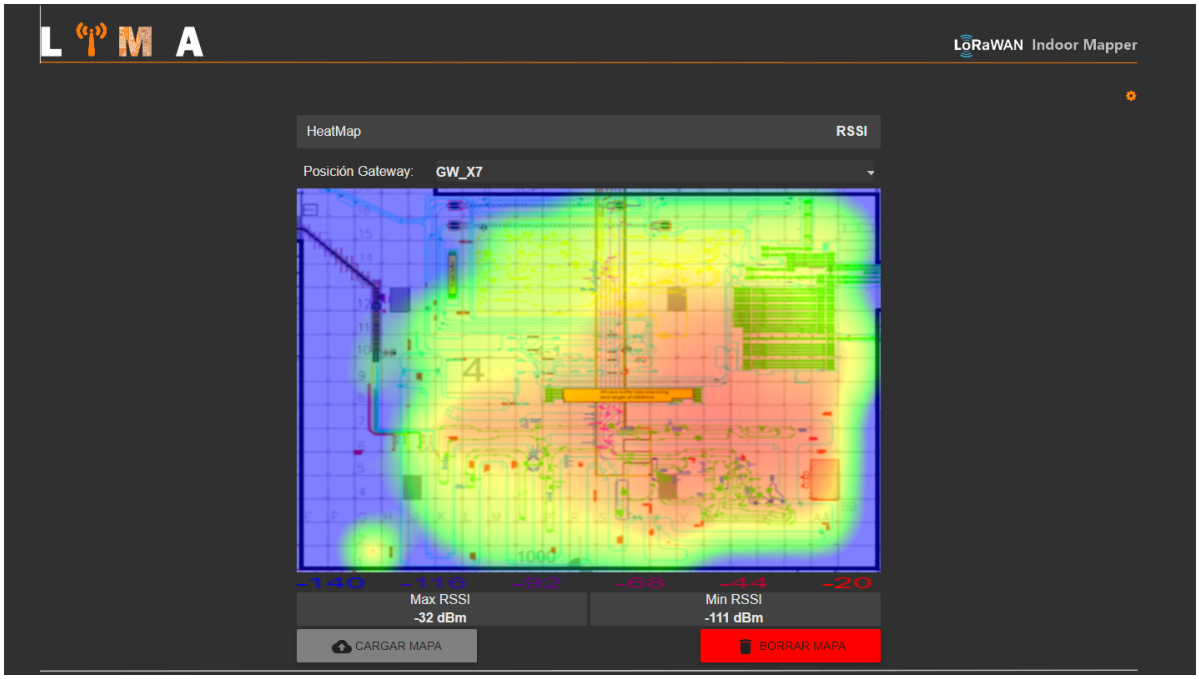


Figura A.2: Mapa de calor representando el RSSI generado por la herramienta

Modelado de la propagación en interiores:

Para obtener una visión completa de la cobertura en todo el entorno interior, la herramienta no se limita a las mediciones puntuales. En una fase inicial, se realiza un muestreo de la SNR en puntos estratégicos del área de interés. Con estos datos, la herramienta calcula un modelo de propagación que permite extrapolar los valores de SNR en función de la distancia al gateway, incluso en aquellos puntos donde no se realizaron mediciones. Este modelo considera las características específicas de la propagación en interiores, como la atenuación por paredes, suelos y objetos, para proporcionar una estimación precisa de la cobertura en todo el espacio.

Muestreo en tiempo real y mapas de calor:

Para complementar el modelo de propagación y obtener información actualizada sobre la cobertura, la herramienta incorpora un mecanismo de muestreo en tiempo real. Un dispositivo móvil, equipado con un módulo LoRaWAN, se desplaza por el entorno interior recibiendo coordenadas de un espacio relativo a la planta. En cada punto, el dispositivo mide la SNR y el RSSI y envía estos datos a la herramienta. Con esta información, la herramienta genera mapas de calor en tiempo real que visualizan la cobertura en todo el espacio interior para todas las variables, incluyendo:

- SNR: Muestra la señal a ruido en cada punto del área. Se trata de la métrica más relevante para la planificación, ya que como se ha visto, impacta directamente en la configuración del SF y por tanto en latencias, duty cycle, consumo de energía y alcance (figura A.1).
- RSSI: Proporciona información adicional sobre la potencia de la señal recibida (figura A.2).
- Número de gateways en alcance: Indica la cantidad de gateways que pueden recibir la señal de un dispositivo en cada punto, lo que permite identificar zonas con mayor redundancia.

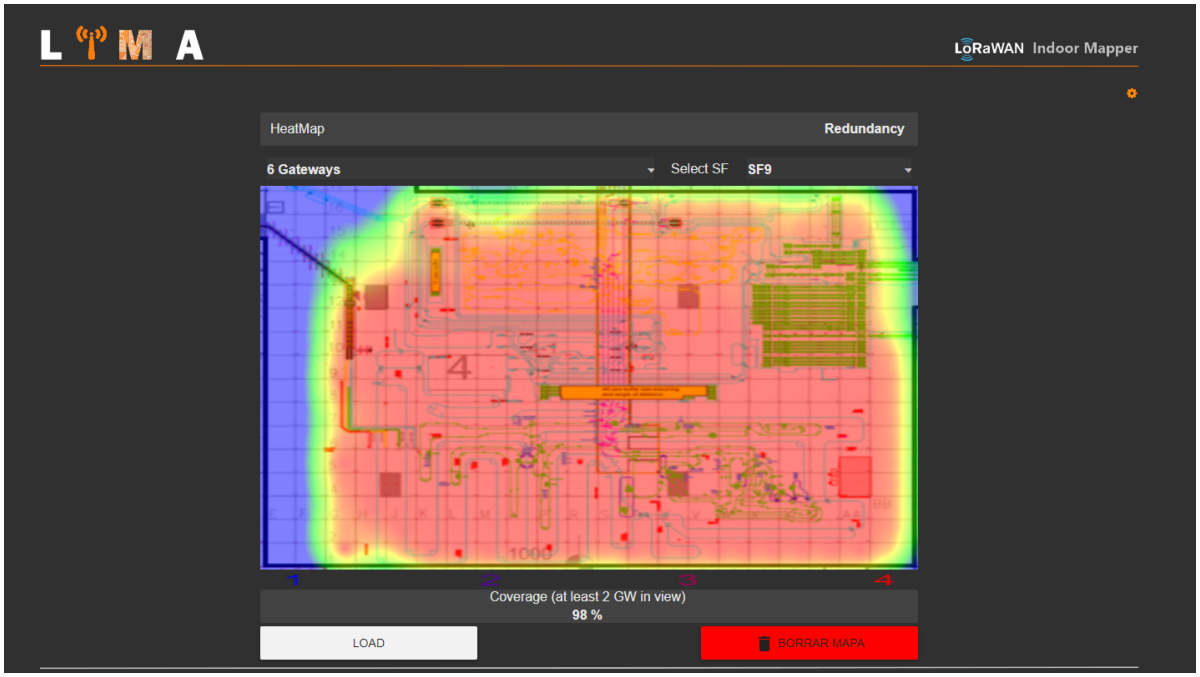


Figura A.3: Mapa de calor representando la redundancia de gateways al alcance

- Redundancia: Evalúa la capacidad de la red para mantener la conectividad en caso de fallo de un gateway, mostrando las zonas donde la comunicación seguiría siendo posible a pesar de la pérdida de un gateway (figura A.3).

Exportación de datos y simulación:

La herramienta permite exportar los datos de cobertura y redundancia para su posterior análisis. Además, ofrece la posibilidad de simular diferentes configuraciones de red, cargando datos de simulaciones offline, o modificando en tiempo real la configuración de los SF y la ubicación de los gateways.

Esto permite al administrador de red evaluar el impacto de diferentes escenarios en la cobertura y la redundancia, llegando así a la configuración de la red para lograr el mejor rendimiento posible.

A.3 El Planificador PSILO: Orquestación Inteligente de la Red LoRaWAN

La herramienta de planificación integrada en esta solución constituye un componente esencial para la gestión eficiente de redes LoRaWAN, especialmente en entornos dinámicos con un gran número de dispositivos. Su capacidad para visualizar la topología de red en tiempo real, calcular la planificación óptima de polling y gestionar grupos multicast la convierte en una herramienta indispensable para la administración y optimización de redes LoRaWAN.

Visualización de la red:

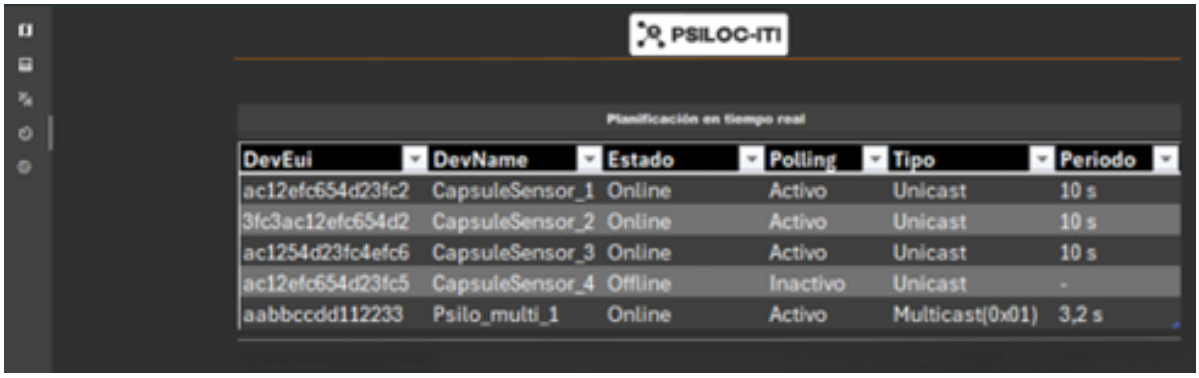


Figura A.4: Captura de la herramienta web de gestión de Polling

El planificador ofrece una representación tabulada en tiempo real de la topología de la red (figura A.4), mostrando la conexión entre gateways y dispositivos. Esta visualización incluye información detallada sobre cada dispositivo, como:

- Estado de conexión: Indica si el dispositivo está conectado y activo en la red.
- Soporte de polling: Especifica si el dispositivo está configurado para responder a las solicitudes de polling.
- Tipo de dispositivo: Identifica si el dispositivo es unicast o multicast.
- Pertenencia a grupos multicast: Muestra a qué grupos multicast pertenece el dispositivo, facilitando la gestión de las comunicaciones grupales.

El planificador calcula automáticamente el periodo óptimo de polling para todos los dispositivos de la red, teniendo en cuenta el número de dispositivos, su tipo (unicast o multicast), la capacidad de la red y los requisitos de cada aplicación. Esta planificación se actualiza dinámicamente ante cualquier cambio en la red, como la adición de nuevos dispositivos, la modificación de la configuración de los dispositivos existentes o la variación en las condiciones del canal. Además, basándose en el mecanismo propuesto en el capitulo anterior, se añade la capacidad de gestionar tamaños de paquete y SF diferentes para cada dispositivo/grupo multicast, calculando diferentes periodos en función del ToA necesario para cada caso.

El planificador se encarga de encolar los mensajes downlink de polling a cada dispositivo en el momento adecuado, optimizando el uso del canal y minimizando el consumo energético. Además, informa al usuario sobre los períodos de muestreo para cada nodo, lo que permite conocer el tiempo de ciclo de datos que se puede esperar y ajustar la frecuencia de polling según las necesidades de la aplicación.

Gestión de grupos multicast:

La herramienta facilita la gestión de grupos multicast, permitiendo al administrador de red crear, configurar y eliminar grupos de dispositivos (figura A.5). El planificador construye automáticamente los mensajes de control necesarios para la gestión de los grupos multicast, incluyendo la adición o eliminación de dispositivos, la configuración de los parámetros de comunicación y la programación de las transmisiones multicast. Estos mensajes se encolan y se envían a los dispositivos en el momento oportuno, garantizando la correcta configuración de los grupos multicast.

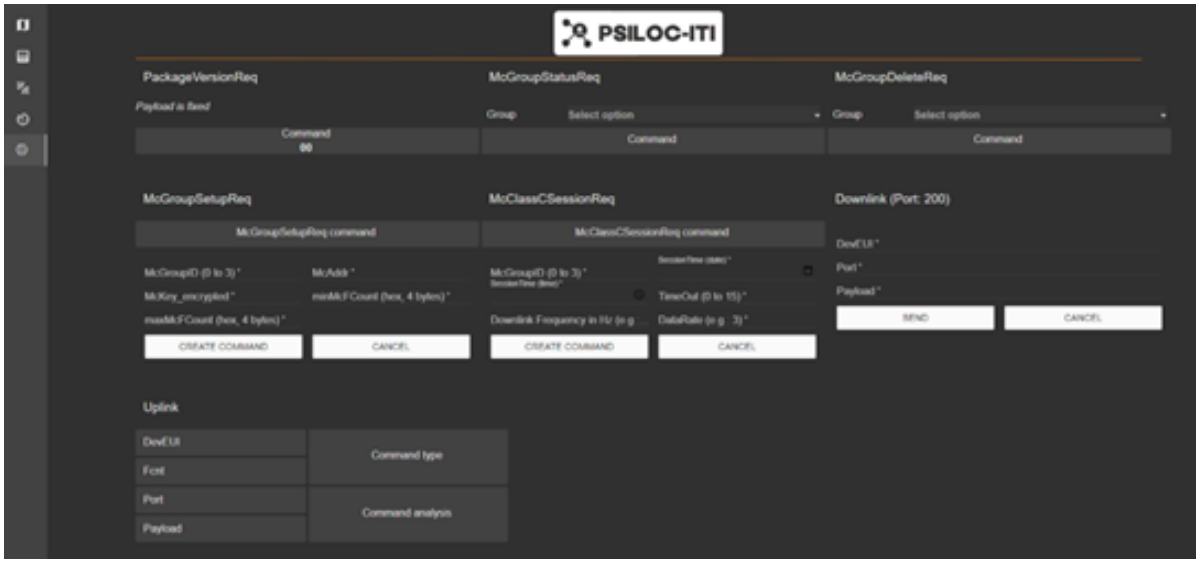


Figura A.5: Captura de la herramienta web para gestión multicast

La gestión de grupos multicast no solo es útil para optimizar el polling, sino también para la gestión de actualizaciones de firmware Over-The-Air (FUOTA) masivas. El planificador permite escalonar la propagación de las actualizaciones FUOTA de forma controlada, priorizando la actualización de ciertos dispositivos o grupos de dispositivos, y minimizando el impacto en el rendimiento de la red.

Por tanto, el planificador integrado en esta herramienta de apoyo al despliegue de redes LoRaWAN ofrece una solución inteligente para la gestión eficiente de la red.

Su capacidad para visualizar la topología de la red, planificar dinámicamente el polling y gestionar grupos multicast hace que sea un componente muy relevante para la optimización del rendimiento, la eficiencia energética y la escalabilidad de las redes LoRaWAN, especialmente en entornos industriales con alta densidad de dispositivos y requisitos de comunicación crítica.

A.4 Metodología de Despliegue Asistido por Herramientas

Una vez presentadas las herramientas LIMA y PSILO, es posible definir un proceso metodológico integral que aprovecha sus capacidades para garantizar un despliegue y operación eficientes de la red. Este proceso se estructura en las siguientes fases interdependientes:

Fase 1: Caracterización del Entorno Operacional (Análisis de Requisitos) La fase inicial de un despliegue en un escenario industrial debe ser la caracterización exhaustiva del entorno donde se instalará, o ya se encuentra trabajando, la red LoRaWAN. Se recogen detalladamente los requisitos de cobertura sobre los planos del área de estudio. Este proceso implica la identificación precisa de las zonas críticas que demandan conectividad, correlacionando las necesidades de la red con los procesos y activos a monitorizar.

Adicionalmente, se realiza un análisis de las restricciones físicas que puedan incidir en el despliegue de la red. Esto incluye la identificación de ubicaciones potenciales para la instalación de gateways, considerando la disponibilidad de infraestructura de alimentación y las limitaciones impuestas por obstáculos físicos que puedan afectar la propagación de la

señal. La información recabada en esta fase establece los fundamentos para un diseño de red fundamentado y efectivo.

Fase 2: Modelización del Espectro y Predicción del Comportamiento de la Red (Análisis del Umbral de Ruido e Interferencias) El espectro electromagnético, caracterizado por la presencia de ruido e interferencias como se ha ido desgranando en los capítulos iniciales, constituye un factor crítico en el rendimiento de las redes LoRaWAN. Por consiguiente, esta fase se enfoca en la modelización de las condiciones de la banda de frecuencia y canales de trabajo y la predicción del comportamiento de la red.

Para ello, se lleva a cabo una adquisición de datos previa y representativa del entorno electromagnético. Esta etapa implica la medición del nivel de ruido de fondo y la identificación de fuentes de interferencia, con el objetivo de caracterizar la propagación de la señal en el entorno específico de estudio.

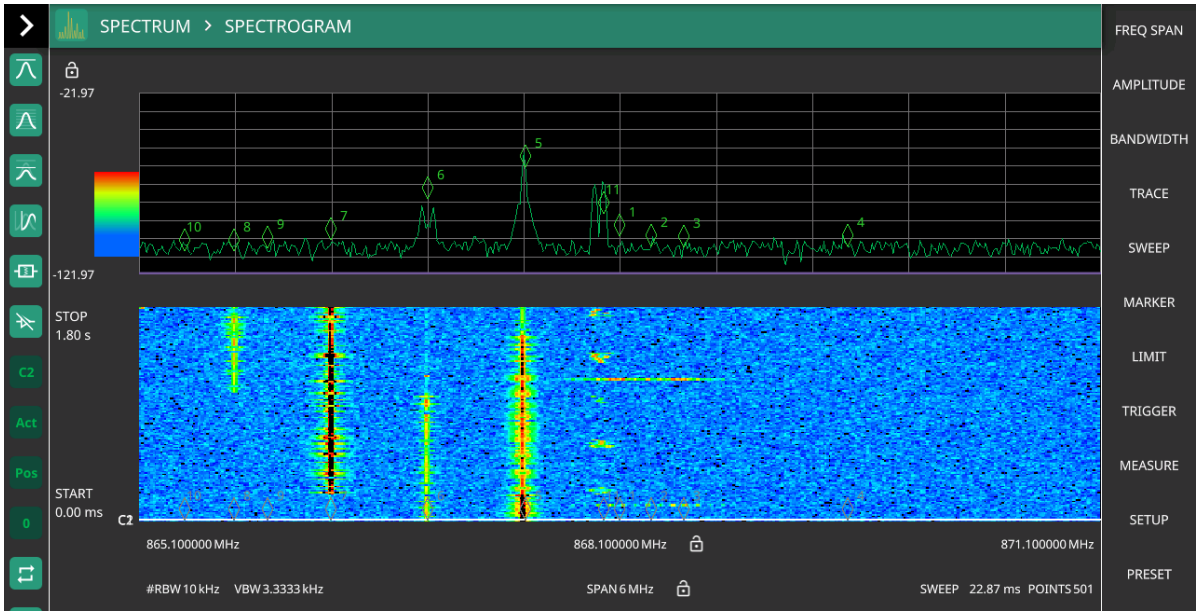


Figura A.6: Espectrograma con el análisis centrado en la banda de 868 MHz

Con base en la información espectral obtenida, se procede a la simulación de diversos escenarios de despliegue de la red, variando la ubicación de los gateways. En este contexto, la herramienta implementada LIMA LoRaWAN Indoor Mapper, adquiere una relevancia significativa.

LIMA proporciona la capacidad de incorporar modelos de pérdidas de propagación personalizados, adaptados a las particularidades del entorno y relacionados directamente con el plano. La asociación de estos modelos a coordenadas específicas en los planos permite realizar simulaciones precisas de la propagación de la señal en entornos interiores.

Asimismo, LIMA facilita la simulación de diferentes configuraciones de red, incluyendo parámetros como la potencia de transmisión o el factor de dispersión (SF), posibilitando la predicción de la cobertura resultante para diferentes ubicaciones de gateways. Esta funcionalidad de simulación reviste una importancia crítica, ya que permite optimizar el diseño de la red de manera virtual, minimizando los requerimientos de despliegue físico y los costos asociados.

Fase 3: Despliegue, Medición y Visualización de la Cobertura (Mapa de Cobertura) Una vez modelizado el espectro y simulados los escenarios de despliegue, se procede a la medición de la cobertura efectiva. Se realiza la recopilación de datos de los gateways en las posiciones resultantes del diseño, registrando parámetros tales como la intensidad de la señal recibida (RSSI) y la relación señal a ruido (SNR). Estos datos proporcionan una evaluación empírica del rendimiento de la red desplegada. Este paso puede ser relevante para validar los modelos empleados y cotejar resultados de la simulación con la realidad, especialmente en entornos donde el escenario presenta condiciones muy cambiantes en el tiempo, por ejemplo, en líneas de producción con diferentes turnos y horarios, donde el modelado previo no ha capturado suficientes valores.

Con los nuevos datos, se puede actualizar en tiempo real el modelo, realizando los ajustes necesarios para cumplir con los requisitos establecidos. Esto puede implicar la reubicación de gateways o la modificación de parámetros de configuración. Se llevan a cabo pruebas de validación para verificar que la red cumple con los criterios de rendimiento definidos en la fase inicial.

Fase 4: Puesta en Marcha de la Aplicación y Optimización de la Captura de Datos Esta fase se centra en la implementación de la aplicación de usuario que utilizará la red LoRaWAN y la optimización de la captura de datos para los procesos de planta. Se utiliza PSILO para optimizar la captura de datos de los dispositivos LoRaWAN adaptándola a las necesidades específicas de la aplicación y los procesos de planta, mediante el mecanismo de polling presentado anteriormente.

PSILO permite programar y controlar la frecuencia de muestreo de los dispositivos, asegurando la obtención de los datos relevantes en el momento oportuno. La funcionalidad multicast de PSILO permite enviar comandos a grupos de dispositivos, optimizando la gestión de la red y facilitando la ejecución de operaciones de mantenimiento, como actualizaciones de firmware o cambios de configuración.

Apoyados en los desarrollos mostrados en los capítulos anteriores, se implementan mecanismos para asegurar la escalabilidad de la red, permitiendo la adición de nuevos dispositivos y la expansión de la cobertura según las necesidades. Se establecen también medidas para garantizar la robustez de la red, minimizando el impacto de posibles fallos y asegurando la continuidad del servicio.

Uno de los puntos fuertes de los que se beneficia esta metodología reside en su capacidad para realizar análisis de cobertura en tiempo real en entornos interiores. A diferencia de las herramientas convencionales que se basan en modelos de propagación en exteriores [64], y vienen limitadas por el posicionamiento GPS [65] o por ubicaciones relativas a campo abierto y con hardware propietario [66] y [67], esta herramienta considera las características específicas de la propagación en interiores, como la atenuación por paredes, suelos y objetos, para proporcionar una evaluación precisa de la calidad de la señal (SNR y RSSI).

Con esos datos, el planificador puede adelantarse al despliegue de dispositivos para configurar los parámetros de cada equipo, como el SF inicial para DROB, organizar los grupos multicast por zonas de la planta, y planificar el polling de la red.

Apéndice B

LoRaWAN para aplicaciones de Smart Farm, entorno rural y montaña

B.1 Introducción

En este apéndice se detalla el funcionamiento de LoRaWAN para aplicaciones de Smart Farming, ya que el sector agrícola es también un sector productivo muy relevante en España para el desarrollo de la industria primaria. La finalidad es comprobar y adaptar el funcionamiento de las redes LoRaWAN a un tipo de aplicación con requisitos diferentes a los estudiados en escenarios típicos de industria manufacturera, como por ejemplo una mayor movilidad de los elementos monitorizados y otro tipo de obstáculos y ruido.

B.2 Caracterización de aplicaciones para LoRaWAN en Smart Farming

Este trabajo analiza la viabilidad de utilizar redes LoRaWAN para aplicaciones inteligentes en entornos rurales, como la agricultura y la ganadería. Se describe un despliegue experimental de una red LoRaWAN en una zona rural de España (figura B.1), que incluye nodos fijos y móviles, para caracterizar el rendimiento de la tecnología en diferentes condiciones ambientales.

Se monitorizaron diferentes parámetros de la red, como la RSSI, la SNR y la PDR, para evaluar la calidad de la señal y la cobertura en función del entorno. Los resultados mostraron que LoRaWAN es una tecnología adecuada para aplicaciones rurales, logrando una cobertura robusta en diferentes escenarios. Se caracterizaron diferentes aplicaciones, como el monitoreo de ganado, la automatización de riego y el seguimiento de animales salvajes, y se proporcionaron recomendaciones de configuración para cada caso. El estudio concluye que LoRaWAN es una solución prometedora para la digitalización de áreas rurales, y que la selección adecuada de la configuración de la red es crucial para garantizar un rendimiento óptimo en función de los requisitos de la aplicación.

Tabla B.1: Recomendaciones de la aplicación de LoRaWAN en entornos rurales, Parte I

SF	Tipo de Entorno	Distancias	Movilidad	Nodos	Descripción
7-8	Tipo C Plano (LoS)	3.5-4 km	Ninguna (fijo)	Tantos como el usuario quiera	Sistema de seguridad para almacenes agrícolas / ganaderos. Registra si las puertas están abiertas o cerradas, así como la ubicación de la maquinaria.
7-8		3.5-4 km	6 km/h aprox.	Nodos en el 10% del ganado 5% de las ovejas/cabras	Sistema de monitoreo para la ganadería extensiva en pequeñas explotaciones. Registra la ubicación del animal, RSSI, SNR y la distancia al centro de la explotación
8-10	Tipo B Plano Mediterráneo bosque	3.5-4 km	Ninguna (fijo)	Uno por bomba de agua/campo	Sistema de riego con control remoto para plantaciones extensivas. Registra la ubicación de la finca, la temperatura y la humedad del suelo, para mejorar el control sobre el crecimiento de las plantaciones
7-10	Tipo A Grandes valles/montañas	3 km	15-20 km/h aprox.	Tantos como animales a monitorear	Sistema de seguimiento para perros de caza. Registra la ubicación del animal, RSSI, SNR y la distancia del propietario

Tabla B.2: Recomendaciones de la aplicación de LoRaWAN en entornos rurales, Parte II (Continuación)

SF	Tipo de Entorno	Distancias	Movilidad	Nodos	Descripción
8-12		3.5-4 km	6 km/h aprox.	Nodos en el 25% del ganado 10% de las ovejas/cabras	Sistema de monitoreo para la ganadería extensiva en zonas montañosas. Registra la ubicación del animal, RSSI, SNR y la distancia al centro de la cerca
10-12		5-5.5 km	20-25 km/h	Dos nodos por rebaño (fauna)	Sistema de monitoreo para la vida silvestre en zonas montañosas. Registra la ubicación del animal, el RSSI y el SNR del dispositivo

Tabla B.3: Recomendaciones de la aplicación de LoRaWAN en entornos rurales, Parte III

SF	Aplicación	Carga útil	Max Mensajes por día	Duración de la batería
7-8	Sistema de seguridad para almacenes	32B	324 (SF7) 182 (SF8)	Conectado a la red
7-8	Monitoreo para ganadería extensiva	44B	278 (SF7) 153 (SF8)	56 días (SF7) 99 días (SF8)
7-9	Sistema de seguimiento para perros de caza	44B	278 (SF7) 153 (SF8)	56 días (SF7) 99 días (SF8)
8-10	Sistema de riego para campos y plantaciones	44B	85 (SF9) 153 (SF8) 11 (SF10)	169 días (SF9) Conectado a la red
8-12	Sistema de monitoreo para ganadería extensiva en zonas montañosas	44B	153 (SF8) 85 (SF9) 45 (SF10) 21 (SF11) 11 (SF12)	99 días (SF8) 169 días (SF9) 291 días (SF10) 514 días (SF11) 758 días (SF12)
10-12	Sistema de monitoreo para la vida silvestre en zonas montañosas	44B	45 (SF10) 21 (SF11) 11 (SF12)	291 días (SF10) 514 días (SF11) 758 días (SF12)

Véase el estudio completo en [68]

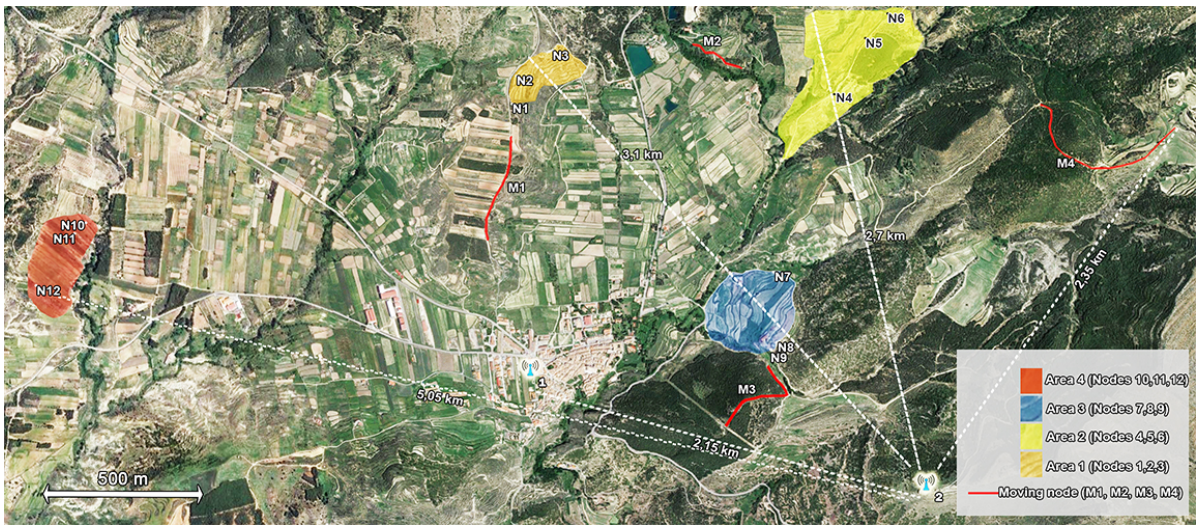


Figura B.1: Vista satélite del escenario monitorizado

B.3 Uso de Gateways móviles para garantizar cobertura

Este trabajo propone una solución híbrida para soportar aplicaciones inteligentes en áreas rurales con escasa o nula cobertura de internet. La solución combina una red LoRaWAN con una puerta de enlace móvil y conectividad 5G, junto con un mecanismo de almacenamiento y reenvío (S&F) para garantizar la continuidad de la comunicación en zonas sin acceso a internet (vease figura B.2).

Se implementó un sistema de monitorización en un área montañosa de la provincia de Teruel (figura B.3), España, para evaluar el rendimiento de la solución propuesta. Se colocaron nodos LoRaWAN en diferentes ubicaciones con características topográficas diversas, y se utilizó una puerta de enlace móvil instalada en un vehículo todoterreno para recopilar datos de los nodos.

Se realizaron experimentos con dos factores de dispersión (SF8 y SF12) para evaluar el impacto en la cobertura y la tasa de mensajes. Los resultados mostraron que la puerta de enlace móvil logró alcanzar todos los nodos con SF12, mientras que una puerta de enlace fija solo cubrió un máximo del 66% de los nodos. El mecanismo S&F mejoró la PDR en casi un 20% para la puerta de enlace móvil cuando se perdía la cobertura celular.

El estudio concluye que la solución híbrida propuesta es una alternativa viable para proporcionar conectividad en áreas rurales con limitaciones de cobertura, y que el mecanismo S&F es crucial para garantizar la recopilación de datos en zonas sin acceso a internet.

Véase completo en [69]

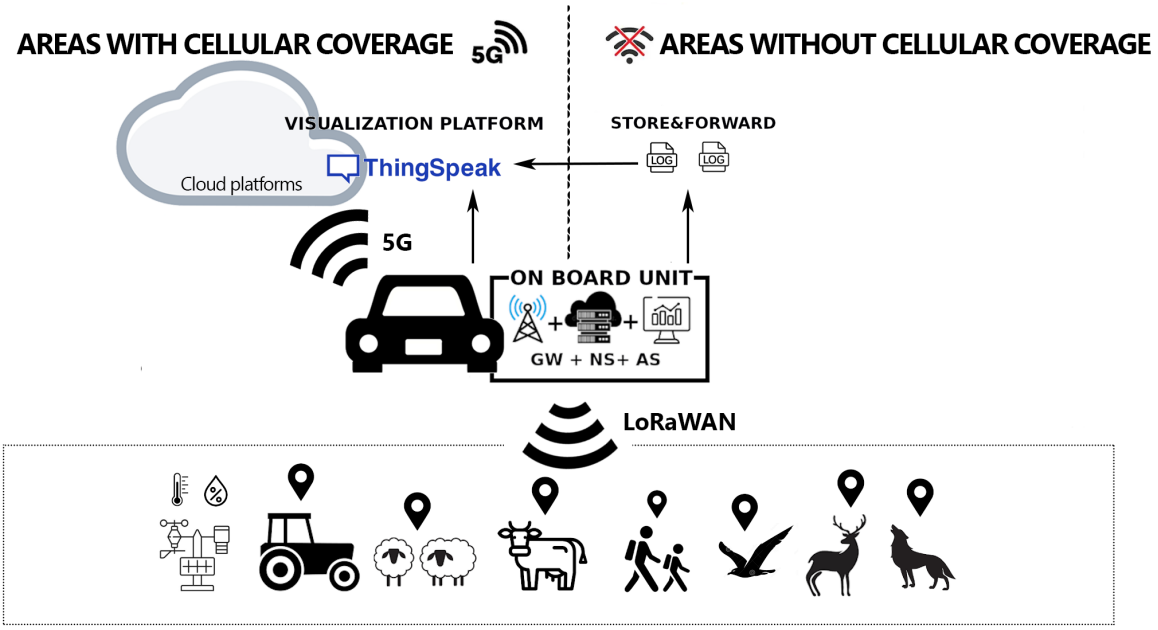


Figura B.2: Diagrama de la solución propuesta en áreas remotas sin cobertura

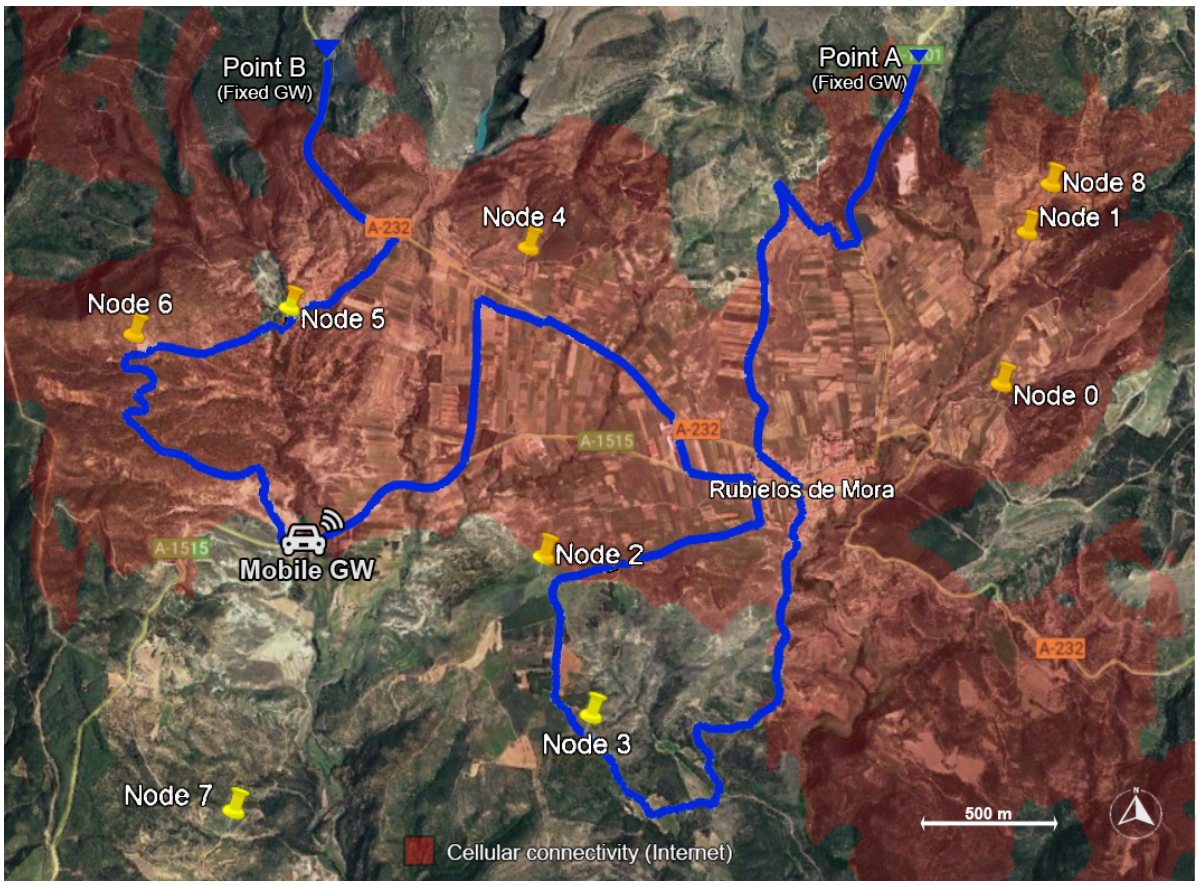


Figura B.3: Vista satélite del área recorrida por el GW móvil y la ubicación de los dispositivos

Tabla B.4: Métricas de enlace obtenidas para la pasarela fija y móvil

Nodos	Pasarela fija Punto A		Pasarela fija Punto B		Pasarela móvil sin S&F		Pasarela móvil con S&F	
	PDR SF8 (%)	PDR SF12 (%)	PDR SF8 (%)	PDR SF12 (%)	PDR SF8 (%)	PDR SF12 (%)	PDR SF8 (%)	PDR SF12 (%)
0	97.82	75	0	0	15.85	27.78	23.17	44.45
1	45.65	58.33	0	0	20.73	22.22	31.71	33.33
2	30.43	83.33	83.33	65	32.92	38.89	48.78	66.67
3	0	0	33.33	0	12.19	16.67	43.9	44.45
4	0	83.33	33.33	0	10.97	38.89	21.95	72.22
5	0	0	83.33	10	8.54	11.11	24.39	16.67
6	0	91.67	58.33	0	28.05	33.33	41.46	50
7	0	0	50	0	0	27.78	0	44.45
8	28.26	83.33	0	0	17.07	33.33	30.48	50
Promedio	22.46	52.78	37.96	8.33	16.26	27.78	29.54	46.92