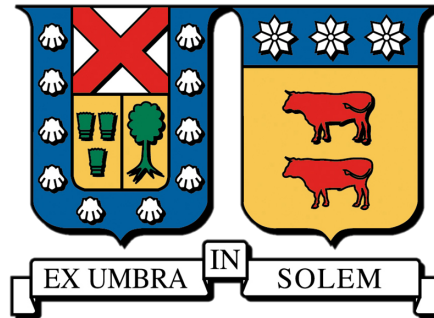


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**Evaluación mediante simulación del desempeño
de configuraciones LoRa/LoRaWAN para telemetría
operacional en micromovilidad compartida**

VICENTE ANTONIO TEJOS MEDEL

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL TELEMÁTICO**

PROFESOR GUÍA:

NICOLÁS JARA CARVALLO

PROFESOR CORREFERENTE:

MOHAMED ABDELHAMID

JULIO 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación mediante simulación del desempeño de configuraciones LoRa/LoRaWAN para telemetría operacional en micromovilidad compartida

Nombre del candidato(a): Vicente Antonio Tejos Medel

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Telemática

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Nicolás Alonso Jara Carvallo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

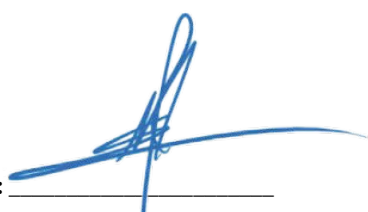
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 02/07/2026 ; **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02/07/2026 ; **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

A mis queridos padres, por su apoyo incondicional, amor, preocupación y confianza a lo largo de mi vida. Han sido un pilar fundamental en cada etapa de este camino. A mis abuelos, por ser parte importante de mi historia y formación. De manera especial, a mi abuelo Vicente Tejos, de quien llevo mi nombre, por acercarme desde pequeño al mundo de la computación; y a mi abuelita Tegualda, por su cariño, cuidado y presencia durante mi infancia. A mi tío Marcos G., por su apoyo y orientación en distintos momentos, y a mi gran amigo Matías A., por acompañarme desde la infancia y mantener una amistad que valoro profundamente.

A Jonathan y Lucas, compañeros y hermanos de varias batallas universitarias, por las jornadas de estudio, proyectos y desafíos compartidos. A Jacqueline, por sus consejos, apoyo y excelente disposición durante mis labores en los laboratorios de Telemática. A Nicolás Jara, por su apoyo en el desarrollo de esta memoria, y por las oportunidades que me permitieron fortalecer mis conocimientos en SysAdmin. Agradezco también al profesor Mohamed, por su disposición, orientación y apoyo durante este proceso. También agradezco al profesor Marcos Z., por permitirme participar en proyectos de su laboratorio, particularmente en Wildsense. A los profesores GT, Germán y Berioska, por sus enseñanzas, conversaciones y orientación en redes de computadores, ciberseguridad y desarrollo profesional.

A Fran S, por su apoyo con la memoria y paciencia con las preguntas sobre el proyecto. A Vania por su apoyo, comprensión y compañía durante este proceso. Asimismo, agradezco a la comunidad de Telemática e Informática, especialmente a DIFTEL, Lab-Comp y LabIT, espacios donde pude aprender, colaborar y crecer. A Haulmer, Corvus y Novared, por las oportunidades de práctica, trabajo y desarrollo profesional.

Finalmente, agradezco a la Universidad y a todas las personas que fueron parte de esta etapa. Cada experiencia, conversación y oportunidad contribuyó a mi crecimiento personal, académico y profesional.

Resumen

La micromovilidad compartida requiere mecanismos de telemetría que permitan monitorear información operacional mínima, como ubicación, identificación del vehículo y nivel de batería. En este contexto, LoRa/LoRaWAN representa una alternativa atractiva para aplicaciones IoT de bajo consumo y paquetes pequeños; sin embargo, su desempeño depende de factores como el *Spreading Factor* (SF), la movilidad, la densidad de nodos y la ocupación del canal.

Esta memoria evalúa mediante simulación el desempeño de configuraciones LoRa/LoRaWAN para telemetría mínima en micromovilidad compartida. Para ello, se implementaron escenarios en OMNeT++ utilizando FLoRa, considerando nodos LoRa, un gateway y un servidor de red. Se definió un payload de 24 bytes y una transmisión cada 30 segundos durante un día de simulación. El análisis se centró en SF7, SF8 y SF9, descartando configuraciones superiores por restricciones asociadas al tamaño de payload en el perfil regional considerado.

Los resultados muestran que SF9 obtiene el mejor desempeño en escenarios de baja densidad, debido a su mayor robustez frente a señales débiles. También se observa que la movilidad degrada el rendimiento respecto de un escenario estático equivalente. En escenarios con mayor densidad de nodos, la principal limitación deja de estar asociada a la sensibilidad de recepción y pasa a estar dominada por colisiones y capacidad efectiva del canal compartido.

En consecuencia, esta memoria identifica condiciones de operación y limitaciones relevantes para el uso de LoRa/LoRaWAN en telemetría mínima de micromovilidad compartida, entregando una base experimental reproducible para futuras validaciones en terreno.

Palabras clave: LoRaWAN, LoRa, micromovilidad compartida, telemetría, OMNeT++, FLoRa, Spreading Factor, simulación, IoT, LPWAN.

Abstract

Shared micromobility systems require telemetry mechanisms to monitor minimal operational information such as location, vehicle identification, and battery level. In this context, LoRa/LoRaWAN is an attractive communication alternative for low-power IoT applications with small payloads. However, its performance depends on factors such as the Spreading Factor (SF), mobility, node density, and channel occupancy.

This thesis evaluates, through simulation, the performance of LoRa/LoRaWAN configurations for minimal telemetry in shared micromobility scenarios. The simulations were implemented in OMNeT++ using FLoRa, considering LoRa nodes, one gateway, and a network server. A 24-byte payload and a 30-second transmission interval were defined for a one-day simulation period. The analysis focused on SF7, SF8, and SF9, excluding higher SF configurations due to payload size restrictions associated with the considered regional profile.

The results show that SF9 achieves the best performance in low-density scenarios due to its higher robustness against weak received signals. Mobility was also observed to degrade performance compared to an equivalent static scenario. In higher-density scenarios, the main limitation is no longer related to receiver sensitivity, but rather to collisions and the effective capacity of the shared channel.

Therefore, this thesis identifies relevant operating conditions and limitations for the use of LoRa/LoRaWAN in minimal telemetry for shared micromobility, providing a reproducible experimental basis for future field validation.

Keywords: LoRaWAN, LoRa, shared micromobility, telemetry, OMNeT++, FLoRa, Spreading Factor, simulation, IoT, LPWAN.

Glosario

Micromovilidad compartida: Servicio de transporte urbano basado en vehículos livianos, como scooters o bicicletas eléctricas, disponibles para uso temporal por parte de distintos usuarios.

Telemetría: Proceso mediante el cual un dispositivo mide y transmite datos operacionales hacia una plataforma o sistema central. En esta memoria se refiere principalmente al envío de ubicación, identificador, marca temporal y nivel de batería.

Nodo LoRa: Dispositivo final encargado de generar y transmitir paquetes de datos mediante tecnología LoRa hacia un gateway. En el contexto de esta memoria representa un scooter o vehículo de micromovilidad simulado.

Gateway: Equipo receptor que concentra las transmisiones enviadas por los nodos LoRa y las reenvía hacia el servidor de red.

Payload: Carga útil del mensaje transmitido. Corresponde a los datos efectivos que se desean enviar, sin considerar cabeceras ni sobrecarga del protocolo.

Uplink: Comunicación desde el nodo final hacia el gateway o servidor de red. En esta memoria corresponde al envío periódico de telemetría desde los scooters simulados.

Downlink: Comunicación desde la red hacia el nodo final. No forma parte central del análisis, ya que el estudio se enfoca en tráfico de monitoreo en sentido nodo–gateway.

Spreading Factor: Parámetro físico de LoRa que define la expansión de la señal. Un valor mayor aumenta la sensibilidad y robustez del enlace, pero también incrementa el tiempo en aire del paquete.

Time-on-Air: Tiempo durante el cual un paquete permanece ocupando el canal radioeléctrico. Es una métrica relevante para estimar la probabilidad de colisiones y la capacidad de la red.

RSSI: Indicador de potencia de señal recibida. Se expresa normalmente en dBm y permite estimar el nivel de señal con que un paquete llega al receptor.

SNIR: Relación entre señal, ruido e interferencia. Permite evaluar la calidad del enlace considerando no solo la potencia recibida, sino también las condiciones de interferencia del canal.

PDR: Proporción de paquetes recibidos correctamente respecto del total de paquetes enviados. Se utiliza como métrica de confiabilidad del enlace.

DER: Razón de entrega de datos o paquetes a nivel de red. En esta memoria se emplea como métrica equivalente o complementaria al PDR, dependiendo de la salida generada por el simulador.

Colisión: Evento en el cual una transmisión no puede ser correctamente decodificada debido al solapamiento o interferencia con otras transmisiones.

Recepción bajo sensibilidad: Condición en la cual la señal recibida se encuentra por debajo del umbral mínimo requerido para ser decodificada correctamente.

Goodput: Tasa efectiva de datos útiles recibidos correctamente, excluyendo pérdidas y sobrecarga de comunicación.

Shadowing: Fenómeno de atenuación de la señal causado por obstáculos del entorno, como edificios, vegetación u otros elementos urbanos.

LoS: Condición de línea de vista directa entre transmisor y receptor.

NLoS: Condición sin línea de vista directa entre transmisor y receptor, generalmente causada por obstáculos físicos.

Simulación de eventos discretos: Técnica de simulación en la cual el sistema evoluciona a partir de eventos que ocurren en instantes específicos de tiempo. OMNeT++ utiliza este enfoque para representar redes de comunicación.

Archivo .sca: Archivo de salida generado por OMNeT++ que almacena métricas escalares y estadísticas agregadas de una simulación.

Archivo .vec: Archivo de salida generado por OMNeT++ que almacena series temporales de variables registradas durante la simulación.

Acrónimos

BW: Bandwidth, ancho de banda del canal.

CR: Coding Rate, tasa de codificación utilizada para corrección de errores.

CSS: Chirp Spread Spectrum, técnica de modulación utilizada por LoRa.

DER: Data Extraction Rate o Data Delivery Ratio, métrica de entrega de datos o paquetes.

FLoRa: Framework de simulación para redes LoRa/LoRaWAN sobre OMNeT++.

IoT: Internet of Things, Internet de las Cosas.

LoRa: Long Range, tecnología de modulación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo.

LoRaWAN: Long Range Wide Area Network, protocolo y arquitectura de red basada en LoRa.

LPWAN: Low Power Wide Area Network, red de área amplia y bajo consumo.

MAC: Medium Access Control, subcapa encargada del control de acceso al medio.

NB-IoT: Narrowband Internet of Things, tecnología celular de baja potencia para IoT.

NLoS: Non-Line-of-Sight, condición sin línea de vista directa.

OMNeT++: Objective Modular Network Testbed in C++, simulador de eventos discretos utilizado para modelar redes de comunicación.

PDR: Packet Delivery Ratio, razón de entrega de paquetes.

PMM: Plataforma de Micromovilidad.

RSSI: Received Signal Strength Indicator, indicador de potencia de señal recibida.

SF: Spreading Factor, factor de propagación utilizado en LoRa.

SNIR: Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio, relación señal a ruido más interferencia.

SNR: Signal-to-Noise Ratio, relación señal a ruido.

ToA: Time-on-Air, tiempo en aire de un paquete.

Tx: Transmisión o transmisor.

Rx: Recepción o receptor.

Índice general

Glosario	IV
Acrónimos	VII
1. Introducción	2
1.1. Contexto, problema y propuesta	2
1.2. Hipótesis	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Alcance y limitaciones	7
1.5. Estructura del documento	8
2. Marco Teórico	9
2.1. Micromovilidad compartida y telemetría	9
2.2. Arquitectura IoT para telemetría	10
2.3. Redes LPWAN	10
2.4. LoRa y LoRaWAN	11
2.5. Parámetros críticos de LoRa	12
2.6. Time-on-Air y ocupación del canal	13
2.7. Propagación, sensibilidad y movilidad	13
2.8. Métricas de desempeño	14
2.9. OMNeT++ y FLoRa	15

2.10. Síntesis	15
3. Estado del Arte	16
3.1. Antecedentes de micromovilidad e IoT	16
3.2. Tecnologías de comunicación para telemetría PMM	17
3.3. Análisis preliminar de consumo energético	20
3.4. LoRa/LoRaWAN en escenarios móviles	21
3.5. Simulación de redes LoRa/LoRaWAN	22
3.6. Brechas identificadas	23
3.7. Aporte de esta memoria	23
4. Modelo de Simulación y Diseño Experimental	24
4.1. Descripción general del modelo	25
4.2. Justificación de la tecnología seleccionada	25
4.3. Topología de red simulada	26
4.4. Justificación del diseño topológico	27
4.5. Representación de las topologías evaluadas	27
4.5.1. Escenarios E1 y E2: dos nodos	28
4.5.2. Escenario E3: diez nodos móviles	30
4.5.3. Escenario E4: veinticinco nodos móviles	32
4.6. Definición del paquete de telemetría	34
4.7. Supuestos de tráfico	35
4.8. Parámetros LoRa/LoRaWAN utilizados	37
4.9. Justificación del rango de Spreading Factor evaluado	38
4.10. Escenarios evaluados	39
4.11. Configuración de movilidad	40
4.12. Métricas recolectadas	41
4.13. Limitaciones del modelo	42

5. Resultados y Análisis Experimental	43
5.1. Metodología de evaluación	43
5.2. Resultados de la línea base 30s	46
5.3. Resultados de los escenarios 1MIN asincrónicos	47
5.4. Comparación directa entre línea base 30s y 1MIN asincrónico	49
5.5. Análisis de pérdida y colisiones	52
5.6. Evaluación de escenarios 1MIN con SF mixto	55
5.7. Análisis de recepciones bajo sensibilidad, RSSI y SNIR	57
5.8. Ocupación estimada del canal y goodput	60
5.9. Validación de hipótesis	62
5.9.1. Validación de H1: efecto del Spreading Factor en baja densidad	62
5.9.2. Validación de H2: impacto de la movilidad	62
5.9.3. Validación de H3: impacto de la densidad de nodos	63
5.9.4. Validación de H4: limitación de escalabilidad del canal com- partido	63
5.10. Ranking técnico de configuraciones	64
5.11. Síntesis de validación de hipótesis	65
5.12. Conclusión parcial	66
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	67
6.1. Conclusiones principales	67
6.2. Respuesta a la hipótesis general	69
6.3. Recomendaciones técnicas	70
6.4. Limitaciones del estudio	71
6.5. Trabajo futuro	72
Anexos	74
Anexo A: Modelo de red NED utilizado	75
Anexo B: Configuración general de operación	77
Anexo C: Medio LoRa y modelo de propagación	78

Anexo D: Tráfico de telemetría	79
Anexo E: Arquitectura gateway–servidor	80
Anexo F: Configuración base de escenarios	81
Anexo G: Configuración por Spreading Factor	83
Anexo H: Configuraciones 1MIN con transmisión asincrónica	84
Anexo I: Configuraciones 1MIN con SF mixto	88
Anexo J: Configuraciones evaluadas desde la interfaz	90
Anexo K: Configuración de prueba para validar movilidad	91
Anexo L: Métricas revisadas en los archivos de salida	92
Anexo M: Observación sobre el registro de movilidad	93
Anexo N: Análisis preliminar de consumo energético	94
Anexo O: Código utilizado para estimar consumo energético	96
Anexo P: Visualización de las topologías en OMNeT++/FLoRa	98

Índice de figuras

3.1. Estimación preliminar de descarga de batería para LoRa y NB-IoT con transmisión periódica cada 30 segundos.	20
4.1. Representación de la topología utilizada para los escenarios E1 y E2. . .	28
4.2. Representación de la topología utilizada para el escenario E3.	30
4.3. Representación de la topología utilizada para el escenario E4.	32
5.1. Mejor PDR/DER por escenario para la línea base de 30 s, la configuración asincrónica de 1 min y la configuración de 1 min con SF mixto. . .	48
5.2. PDR/DER según cantidad de nodos para la línea base 30s, los escenarios 1MIN asincrónicos y los escenarios 1MIN con SF mixto.	50
5.3. Comparación de colisiones entre la mejor configuración de la línea base 30s, la mejor configuración 1MIN asincrónica y los escenarios 1MIN con SF mixto.	52
5.4. Tasa de colisiones según cantidad de nodos y configuración temporal. .	53
5.5. Tasa de pérdida de paquetes según cantidad de nodos y configuración temporal.	54
5.6. Recepciones bajo sensibilidad según cantidad de nodos y configuración temporal.	57
5.7. Relación entre RSSI promedio y PDR/DER.	58
5.8. Relación entre SNIR promedio y PDR/DER.	59
5.9. Relación entre ocupación estimada del canal y tasa de colisiones.	61

6.1. Validación de la configuración de movilidad en el archivo <code>.vci</code>	93
6.2. Estimación preliminar de descarga de batería para LoRa y NB-IoT con transmisión periódica cada 30 segundos.	94
6.3. Visualización en OMNeT++/FLoRa de la topología utilizada para los escenarios E1 y E2.	98
6.4. Visualización en OMNeT++/FLoRa de la topología utilizada para el escenario E3.	99
6.5. Visualización en OMNeT++/FLoRa de la topología utilizada para el escenario E4.	100

Índice de tablas

3.2. Comparación de tecnologías consideradas para telemetría PMM.	19
4.1. Componentes principales de la topología LoRa/LoRaWAN simulada. . .	26
4.3. Especificaciones de las topologías utilizadas en los escenarios E1 y E2. . .	29
4.5. Especificaciones de la topología utilizada en el escenario E3.	31
4.7. Especificaciones de la topología utilizada en el escenario E4.	33
4.8. Estructura del paquete de telemetría utilizado en la simulación.	34
4.10. Supuestos de tráfico utilizados en los escenarios simulados.	36
4.11. Parámetros LoRa/LoRaWAN constantes utilizados en la simulación. . .	37
4.12. Viabilidad del payload de 24 bytes según data rate de referencia en US915.	38
4.13. Escenarios de simulación evaluados.	39
4.14. Familias experimentales utilizadas para comparar escenarios base y asincrónicos.	40
4.15. Métricas utilizadas para evaluar el desempeño de la red.	41
5.2. Familias experimentales consideradas en el análisis y cantidad de pa- quetes configurados por nodo para un día de simulación.	44
5.3. Resultados principales de la línea base con transmisión cada 30 segundos. .	46
5.4. Resultados principales de los escenarios 1MIN asincrónicos con SF fijo. .	47
5.5. Comparación directa entre la línea base 30s y los escenarios 1MIN asincrónicos para el mismo escenario y SF.	49
5.7. Resultados principales de los escenarios de 1 min con SF mixto.	55

5.8. Comparación entre la mejor configuración de la línea base 30s, la mejor configuración 1MIN asincrónica y los escenarios 1MIN con SF mixto. . .	56
5.10. Ocupación estimada de canal, <i>Time-on-Air</i> y <i>goodput</i> de payload para configuraciones representativas.	60
5.11. Clasificación cualitativa de las configuraciones según su desempeño observado.	64
5.12. Síntesis de validación de hipótesis.	65
6.2. Resumen de configuraciones ejecutadas desde la interfaz de OMNeT++. .	90
6.4. Métricas principales revisadas en los archivos .sca.	92

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto, problema y propuesta

La movilidad urbana ha experimentado cambios relevantes durante los últimos años, impulsados por la congestión vehicular, el aumento de los tiempos de desplazamiento, la búsqueda de alternativas de transporte más flexibles y el avance de la electromovilidad. En este escenario, la micromovilidad eléctrica liviana, representada principalmente por scooters y bicicletas eléctricas, se ha consolidado como una alternativa para trayectos cortos, conexión de última milla y desplazamientos complementarios al transporte público.

En Chile, el uso de vehículos eléctricos livianos ha comenzado a adquirir mayor presencia en entornos urbanos. Diversas fuentes recientes destacan el crecimiento del mercado de scooters eléctricos, la mayor frecuencia de uso de este tipo de transporte y la evolución de la movilidad eléctrica liviana como una tendencia cada vez más cotidiana en las ciudades [1, 2, 3]. Este contexto evidencia que la micromovilidad ya no corresponde únicamente a una innovación puntual, sino a una alternativa que empieza a formar parte de la movilidad urbana diaria.

La operación de servicios de micromovilidad compartida requiere información operacional básica de cada vehículo. Variables como ubicación, identificación de la unidad, nivel de batería y estado de movimiento permiten apoyar tareas como disponibilidad de vehículos, recarga, redistribución, mantenimiento y respuesta frente a eventos operacionales. Sin esta información, la gestión de la flota se vuelve limitada, especialmente cuando los vehículos se encuentran distribuidos en distintas zonas de la ciudad y se desplazan continuamente.

Además de los desafíos propios de la operación diaria, la micromovilidad compartida enfrenta problemas asociados a disponibilidad, seguridad, vandalismo, robo de unidades y continuidad del servicio. En Chile se han reportado casos donde la operación de flotas de scooters se ha visto afectada por robos y daños a los vehículos [4]. Este tipo de situaciones refuerza la necesidad de contar con mecanismos de monitoreo que permitan conocer el estado y ubicación de los vehículos de forma periódica.

Desde el punto de vista tecnológico, estos sistemas pueden apoyarse en arquitecturas IoT compuestas por dispositivos embarcados, sensores, conectividad inalámbrica, plataformas de recepción de datos y herramientas de visualización. Sin embargo, dentro de dicha arquitectura, la capa de comunicación resulta crítica. La pérdida de paquetes, la baja cobertura, la saturación del canal o una configuración inadecuada de transmisión pueden afectar directamente la continuidad de la telemetría y, por consecuencia, la capacidad de monitorear la flota.

En este contexto, LoRa/LoRaWAN se presenta como una alternativa de comunicación LPWAN atractiva para aplicaciones de telemetría de bajo volumen, debido a su largo alcance, bajo consumo y operación en bandas sub-GHz. No obstante, su desempeño depende de múltiples factores, entre ellos el *Spreading Factor* (SF), el ancho de banda (BW), la tasa de codificación (CR), la potencia de transmisión, el tamaño del *payload*, la periodicidad de envío, la movilidad de los nodos y la cantidad de dispositivos que comparten el canal.

El problema abordado en esta memoria consiste en evaluar cómo varía el desempeño de una red LoRa/LoRaWAN al transmitir telemetría mínima asociada a micromovilidad compartida, considerando distintos escenarios de simulación, variaciones de densidad de nodos, diferentes valores de *Spreading Factor* y distintos patrones de transmisión. Para ello, se utiliza OMNeT++ junto con el framework FLoRa, permitiendo construir escenarios reproducibles y obtener métricas de desempeño a partir de archivos de salida generados por el simulador.

Esta memoria toma como antecedente el trabajo desarrollado previamente en el contexto del PMM asociado al Desafío 14, en el cual se abordó la problemática general de la micromovilidad compartida y la necesidad de disponer de información operacional proveniente de los vehículos. Asimismo, se consideran como referencia los avances presentados en la tesis de Cristóbal Caqueo [5], sin que ello implique una participación conjunta en dicho desarrollo. A partir de estos antecedentes, la presente memoria desarrolla de manera independiente una evaluación centrada específicamente en la capa de comunicación.

En particular, se analiza el comportamiento de LoRa/LoRaWAN cuando los nodos utilizan patrones temporales distribuidos y configuraciones de SF fijas o mixtas, en lugar de transmitir de manera simultánea o con intervalos completamente sincronizados. La contribución principal corresponde al análisis del enlace bajo condiciones controladas de simulación, con el propósito de identificar configuraciones, limitaciones y recomendaciones relevantes para el transporte de telemetría operacional mínima en aplicaciones de micromovilidad compartida.

1.2. Hipótesis

La configuración del *Spreading Factor*, la movilidad, la densidad de nodos y el patrón temporal de transmisión influyen directamente en el desempeño de una red LoRa-/LoRaWAN utilizada para telemetría mínima de micromovilidad compartida. En particular, se espera que valores mayores de SF mejoren la robustez del enlace en escenarios de baja densidad, mientras que en escenarios con mayor cantidad de nodos la principal limitación esté asociada a la pérdida de paquetes, colisiones y ocupación del canal. Asimismo, se espera que un patrón de transmisión asincrónico, con envíos distribuidos temporalmente, mejore la entrega efectiva de paquetes respecto de una configuración periódica homogénea.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de configuraciones LoRa/LoRaWAN para la transmisión de telemetría mínima en micromovilidad compartida mediante simulación controlada en OMNeT++/FLoRa, con el fin de identificar configuraciones recomendables y limitaciones de rendimiento bajo distintos escenarios de movilidad y densidad de nodos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar escenarios de simulación LoRa/LoRaWAN representativos de telemetría mínima en micromovilidad compartida.
- Configurar una topología de comunicación basada en nodos LoRa, un gateway y un servidor de red en OMNeT++/FLoRa.
- Evaluar el desempeño de los *Spreading Factors* SF7, SF8 y SF9 bajo condiciones controladas.
- Analizar el impacto de la movilidad y de la densidad de nodos sobre el rendimiento de la red.
- Comparar una línea base de transmisión cada 30 segundos con escenarios asincrónicos de envío promedio cada 60 segundos.
- Evaluar el efecto de configuraciones con SF fijo y SF mixto sobre la entrega de paquetes y la ocurrencia de colisiones.
- Medir métricas de desempeño como DER/PDR, pérdida de paquetes, colisiones, recepciones bajo sensibilidad, RSSI, SNIR, *goodput* y ocupación estimada del canal.
- Identificar las principales limitaciones observadas en los escenarios simulados y proponer recomendaciones de configuración para el caso de uso evaluado.

1.4. Alcance y limitaciones

Esta memoria se acota a la simulación y análisis de desempeño de comunicaciones LoRa/LoRaWAN para telemetría mínima en micromovilidad compartida. El *payload* considerado representa información operacional básica de un vehículo, incluyendo identificador, marca temporal, ubicación, aceleración y nivel de batería. No se busca implementar una plataforma IoT completa, sino evaluar la capa de comunicación asociada al envío de dicha telemetría hacia un gateway.

El alcance metodológico considera tres familias experimentales. La primera corresponde a una línea base con transmisión periódica cada 30 segundos, equivalente a 2880 paquetes configurados por nodo durante un día de simulación. La segunda corresponde a escenarios asincrónicos con envío promedio cada 60 segundos y jitter temporal, equivalentes a 1440 paquetes configurados por nodo. La tercera corresponde a escenarios con SF mixto, donde los nodos se distribuyen entre SF7, SF8 y SF9 para evaluar si una asignación heterogénea de parámetros radio modifica el comportamiento de la red.

Se consideran dentro del alcance:

- Simulación de escenarios LoRa/LoRaWAN en OMNeT++/FLoRa.
- Evaluación de escenarios estáticos y móviles.
- Evaluación de escenarios con distinta cantidad de nodos.
- Comparación de SF7, SF8 y SF9.
- Comparación entre transmisión periódica cada 30 segundos y transmisión asincrónica con envío promedio cada 60 segundos.
- Evaluación de configuraciones con SF fijo y SF mixto.
- Análisis de métricas de desempeño obtenidas desde archivos `.sca`.

Quedan fuera del alcance:

- Implementación física de hardware IoT.
- Desarrollo de firmware productivo.
- Desarrollo de backend, dashboard o aplicación móvil.
- Integración con plataformas cloud comerciales.
- Validación experimental en terreno con mediciones reales.
- Implementación de mecanismos avanzados de seguridad o gestión de usuarios.
- Optimización de rutas, predicción de demanda o redistribución de flota.

La validación en terreno, la calibración del modelo de propagación, la evaluación de múltiples gateways, el uso de múltiples canales y el análisis de ADR se consideran como líneas de trabajo futuro.

1.5. Estructura del documento

El resto de esta memoria se organiza de la siguiente manera. El Capítulo 2 presenta el marco teórico, describiendo los conceptos asociados a micromovilidad compartida, telemetría, redes LPWAN, LoRa/LoRaWAN, parámetros físicos, propagación, movilidad y métricas de desempeño. El Capítulo 3 revisa el estado del arte y los trabajos relacionados con plataformas IoT, micromovilidad y comunicaciones LoRa/LoRaWAN. El Capítulo 4 describe el modelo de simulación y el diseño experimental implementado en OMNeT++/FLoRa. El Capítulo 5 presenta los resultados obtenidos y su análisis comparativo. Finalmente, el Capítulo 6 expone las conclusiones, limitaciones del estudio y líneas de trabajo futuro.

Capítulo 2

Marco Teórico

Para comprender el diseño experimental desarrollado en esta memoria, es necesario establecer los fundamentos técnicos asociados a la micromovilidad compartida, la telemetría IoT, las redes LPWAN y el funcionamiento de LoRa/LoRaWAN. Este capítulo presenta dichos conceptos, enfatizando aquellos que inciden directamente en el desempeño de la capa de comunicaciones.

2.1. Micromovilidad compartida y telemetría

La micromovilidad compartida comprende servicios de uso temporal de vehículos eléctricos livianos, tales como scooters y bicicletas. Para sostener la operación de estos servicios es necesario contar con información básica de cada unidad, principalmente ubicación, estado de batería y condición operacional. Estos datos permiten apoyar procesos como disponibilidad de vehículos, recarga, redistribución y mantenimiento.

En esta memoria, la micromovilidad compartida se utiliza como caso de aplicación para evaluar comunicaciones LoRa/LoRaWAN. No se aborda la operación completa de una empresa de micromovilidad ni la implementación de una plataforma comercial, sino únicamente el transporte de telemetría mínima desde nodos simulados hacia un gateway.

La telemetría considerada se restringe a información operacional acotada y representada mediante paquetes pequeños. Este enfoque permite analizar el desempeño de la red sin introducir complejidad adicional asociada a lógica de negocio, analítica predictiva, aplicaciones móviles o interfaces de usuario.

2.2. Arquitectura IoT para telemetría

Una arquitectura IoT típica integra dispositivos embarcados, sensores, conectividad inalámbrica, una plataforma de recepción de datos y mecanismos de visualización. En el caso de micromovilidad, los dispositivos embarcados pueden capturar variables como ubicación, batería, aceleración o estado del vehículo, para luego transmitir las hacia una infraestructura central.

Dentro de esta arquitectura, la capa de comunicación es crítica, ya que determina si los datos generados por los nodos llegan correctamente al sistema central. Pérdidas de paquetes, baja cobertura, interferencia o saturación del canal pueden afectar la continuidad de la telemetría. Por esta razón, esta memoria se concentra exclusivamente en evaluar la capa de conectividad, dejando fuera la implementación de backend, aplicaciones, autenticación, almacenamiento o gestión de usuarios.

2.3. Redes LPWAN

Las redes LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*) están diseñadas para comunicaciones de largo alcance, bajo consumo energético y baja tasa de datos. Estas características las hacen adecuadas para aplicaciones IoT donde los dispositivos transmiten paquetes pequeños de forma periódica o esporádica.

En este tipo de redes, el objetivo no es alcanzar altas velocidades de transmisión, sino permitir que múltiples dispositivos distribuidos puedan enviar información operacional con bajo consumo y cobertura amplia. Sin embargo, estas ventajas se obtienen a costa de restricciones importantes, como menor capacidad de canal, límites de payload, mayor latencia y sensibilidad frente a la densidad de nodos.

Entre las tecnologías LPWAN se encuentran LoRaWAN, Sigfox y NB-IoT. La comparación específica entre estas alternativas se aborda en el Capítulo 3, mientras que este capítulo se enfoca en los conceptos necesarios para comprender el comportamiento de LoRa/LoRaWAN en el modelo de simulación.

2.4. LoRa y LoRaWAN

LoRa (*Long Range*) es una tecnología de modulación basada en *Chirp Spread Spectrum* (CSS), diseñada para lograr comunicaciones de largo alcance con bajo consumo energético y bajas tasas de transmisión. Su desempeño depende de parámetros físicos configurables que determinan la robustez del enlace, la sensibilidad de recepción y el tiempo durante el cual un paquete ocupa el canal.

LoRaWAN, por su parte, define una arquitectura de red construida sobre LoRa. En una red LoRaWAN típica existen nodos finales o *end devices*, uno o más gateways y un servidor de red. Los nodos transmiten principalmente mensajes *uplink* hacia el gateway, el cual reenvía los paquetes al servidor de red mediante conectividad IP.

El acceso al medio en LoRaWAN se asemeja a un esquema aleatorio tipo ALOHA. Esto implica que los nodos pueden transmitir sin coordinación estricta entre ellos, por lo que la probabilidad de colisiones aumenta cuando crece la cantidad de dispositivos, la frecuencia de transmisión o el tiempo en aire de los paquetes.

2.5. Parámetros críticos de LoRa

El desempeño de un enlace LoRa/LoRaWAN está condicionado por distintos parámetros físicos. Entre los más relevantes se encuentran el *Spreading Factor*, el ancho de banda, la tasa de codificación, la potencia de transmisión y el tamaño del payload.

- **Spreading Factor (SF):** define la cantidad de símbolos utilizados para representar la información. Un SF mayor incrementa la sensibilidad y la robustez del enlace, permitiendo decodificar señales más débiles. Sin embargo, también aumenta el *Time-on-Air* y reduce la tasa de bits efectiva.
- **Bandwidth (BW):** corresponde al ancho de banda del canal. Un mayor ancho de banda puede reducir el tiempo en aire, aunque también afecta la sensibilidad del receptor.
- **Coding Rate (CR):** define la redundancia agregada para corrección de errores. Una mayor redundancia puede mejorar la tolerancia frente a errores, pero incrementa el tiempo de transmisión.
- **Potencia de transmisión:** influye en el margen del enlace y en la potencia recibida por el gateway. Aumentarla puede mejorar la cobertura, pero también incrementa el consumo energético y la interferencia potencial.
- **Tamaño de payload:** paquetes más grandes ocupan el canal durante más tiempo, aumentando la probabilidad de solapamiento con otras transmisiones.

En esta memoria, el análisis se concentra principalmente en el efecto del *Spreading Factor*, manteniendo constantes otros parámetros físicos relevantes para facilitar una comparación controlada.

2.6. Time-on-Air y ocupación del canal

El *Time-on-Air* (ToA) corresponde al tiempo durante el cual un paquete permanece transmitiéndose en el canal. Este valor depende del SF, BW, CR, preámbulo y tamaño del payload. En términos generales, un aumento del SF incrementa el ToA, lo que puede mejorar la robustez del enlace, pero reduce la capacidad disponible del canal.

En escenarios con múltiples nodos, el tiempo en aire agregado permite aproximar la ocupación temporal del medio. Si varios dispositivos transmiten con alta frecuencia o utilizan configuraciones con mayor ToA, aumenta la probabilidad de solapamiento entre paquetes. Por ello, la selección del SF no debe evaluarse únicamente desde la perspectiva de cobertura, sino también desde su efecto sobre la capacidad y escalabilidad de la red.

Una forma simplificada de estimar la ocupación del canal es relacionar el tiempo total de transmisión con el tiempo total de simulación:

$$\text{Ocupación del canal} = \frac{N_{\text{paquetes}} \cdot ToA}{T_{\text{simulación}}} \quad (2.1)$$

Esta expresión permite interpretar la carga temporal generada por los nodos sobre el medio compartido.

2.7. Propagación, sensibilidad y movilidad

En escenarios urbanos, la señal de radiofrecuencia puede sufrir atenuación por distancia, obstrucciones, vegetación, edificaciones y efectos de multitrayectoria. Estos fenómenos modifican la potencia recibida y la relación señal a interferencia y ruido, afectando la recepción de paquetes.

La movilidad de los nodos introduce variaciones adicionales, ya que la distancia entre nodo y gateway cambia durante el tiempo de simulación. Además, el desplazamiento puede provocar transiciones entre condiciones con línea de vista (LoS) y sin línea de vista (NLoS). En este contexto, métricas como RSSI, SNIR y recepciones bajo

sensibilidad permiten evaluar la calidad del enlace.

El RSSI representa la potencia recibida, mientras que el SNIR refleja la relación entre señal, ruido e interferencia. Sin embargo, un RSSI más bajo no implica necesariamente peor desempeño, ya que LoRa puede decodificar señales débiles cuando se utilizan configuraciones más robustas, como SF más altos.

2.8. Métricas de desempeño

Para comparar los escenarios simulados, esta memoria utiliza métricas cuantitativas orientadas a confiabilidad, calidad de enlace y uso del canal.

El PDR/DER se utiliza como indicador principal de entrega de paquetes. Representa la proporción de paquetes recibidos correctamente respecto de los paquetes enviados:

$$PDR = \frac{N_{\text{recibidos}}}{N_{\text{enviados}}} \quad (2.2)$$

La pérdida de paquetes representa la fracción de paquetes que no fueron recibidos correctamente:

$$\text{Pérdida} = 1 - PDR \quad (2.3)$$

El *goodput* corresponde a la tasa efectiva de información útil recibida correctamente. En esta memoria se calcula a partir del número de paquetes recibidos, el tamaño del payload y el tiempo total de simulación:

$$\text{Goodput} = \frac{N_{\text{recibidos}} \cdot \text{Payload} \cdot 8}{T_{\text{simulación}}} \quad (2.4)$$

Además de estas métricas, se consideran colisiones, recepciones bajo sensibilidad, RSSI, SNIR y ocupación estimada del canal. En conjunto, estas métricas permiten identificar si la degradación del rendimiento se debe principalmente a cobertura, sensibilidad, interferencia, colisiones, aumento de densidad de nodos o exceso de carga temporal sobre el medio.

2.9. OMNeT++ y FLoRa

OMNeT++ es un simulador de eventos discretos orientado al modelamiento de redes mediante módulos jerárquicos y parametrizables. Permite definir topologías, tráfico, movilidad, canales de comunicación y mecanismos de recolección de resultados.

FLoRa es un framework desarrollado sobre OMNeT++ para la simulación de redes LoRa/LoRaWAN. Incluye módulos para representar nodos finales, gateways, servidor de red, canal radioeléctrico, interferencia, movilidad y parámetros físicos de LoRa. Su uso permite ejecutar escenarios reproducibles y comparar configuraciones antes de realizar implementaciones físicas o pruebas de campo.

En esta memoria, OMNeT++ y FLoRa se utilizan como herramientas de simulación para evaluar el desempeño de configuraciones LoRa/LoRaWAN. La descripción específica del modelo, escenarios, topologías y parámetros utilizados se presenta en el Capítulo 4.

2.10. Síntesis

El marco teórico muestra que LoRa/LoRaWAN es una tecnología adecuada para telemetría de bajo volumen, pero su desempeño depende de la configuración física, movilidad, densidad de nodos y ocupación del canal. El uso de simulación controlada en OMNeT++/FLoRa permite estudiar estas relaciones de forma reproducible, identificando configuraciones y limitaciones relevantes para aplicaciones de micromovilidad compartida.

Capítulo 3

Estado del Arte

La micromovilidad compartida requiere mecanismos de monitoreo capaces de reportar información operacional básica desde vehículos distribuidos hacia una plataforma central. En este contexto, las soluciones IoT suelen integrar sensores embarcados, conectividad inalámbrica, procesamiento de datos y visualización. Sin embargo, para aplicaciones de telemetría mínima no siempre se requiere alta tasa de datos, sino comunicaciones periódicas, paquetes pequeños, bajo consumo y cobertura suficiente para nodos móviles.

Este capítulo revisa los antecedentes que aportan directamente a esta memoria: plataformas IoT aplicadas a micromovilidad, tecnologías LPWA para telemetría, uso de LoRa/LoRaWAN en escenarios móviles y simulación de redes LoRa/LoRaWAN.

3.1. Antecedentes de micromovilidad e IoT

Las plataformas IoT para micromovilidad compartida suelen considerar una arquitectura compuesta por un dispositivo embarcado, sensores, conectividad inalámbrica, backend y mecanismos de visualización. Estas plataformas permiten reportar variables como ubicación, estado de batería, disponibilidad del vehículo, eventos de movimiento o fallas operacionales.

Un antecedente relevante para esta memoria corresponde a la tesis de Cristóbal Ignacio Caqueo Ledesma, orientada al diseño e implementación de una plataforma IoT para el monitoreo de vehículos de movilidad compartida [5]. Dicho trabajo se utiliza como referencia documental para comprender el caso de aplicación, la arquitectura general de monitoreo y las variables operacionales asociadas a los vehículos.

Otros trabajos sobre bicicletas eléctricas, scooters y plataformas de movilidad compartida muestran que los datos operacionales más comunes corresponden a ubicación GPS, identificación del vehículo, estado de batería y variables de movimiento [6, 7, 8]. Estos antecedentes permiten justificar la estructura lógica del mensaje utilizado en esta memoria, compuesto por identificador, timestamp, coordenadas GPS, acelerómetro y nivel de batería, con un tamaño total de 24 bytes.

3.2. Tecnologías de comunicación para telemetría PMM

Antes de definir el modelo de simulación, se revisaron distintas alternativas de conectividad aplicables a telemetría operacional en micromovilidad compartida. Las tecnologías consideradas fueron Wi-Fi, Sigfox, NB-IoT y LoRa/LoRaWAN. La comparación se realizó considerando tamaño de payload, consumo estimado, cobertura, movilidad, dependencia de infraestructura y factibilidad de evaluación mediante simulación.

Wi-Fi fue descartado como tecnología principal porque no corresponde a una solución LPWA y se orienta a escenarios de mayor tasa de datos y menor alcance relativo. Aunque puede ser útil para conectividad local, no resulta la opción más adecuada para nodos distribuidos que transmiten paquetes pequeños desde vehículos en movimiento.

Sigfox fue considerado como alternativa LPWA de baja tasa de datos. Sin embargo, su restricción de payload uplink resulta incompatible de forma directa con el mensaje de 24 bytes definido en esta memoria, por lo que su uso requeriría fragmentar la información o reducir los campos de telemetría [9].

NB-IoT representa una alternativa LPWA celular relevante, con ventajas en cobertura gestionada, confiabilidad y mecanismos propios de red. No obstante, su uso implica mayor dependencia de infraestructura de operador y, bajo los supuestos revisados, un mayor consumo estimado frente a LoRaWAN para transmisiones pequeñas y periódicas [10, 11].

LoRa/LoRaWAN fue seleccionada como tecnología de referencia para la simulación debido a que se ajusta al tipo de tráfico considerado: mensajes pequeños, baja tasa de datos, comunicación uplink y nodos distribuidos hacia un gateway. Además, permite evaluar distintos valores de *Spreading Factor*, lo que hace posible estudiar el compromiso entre sensibilidad, alcance, tiempo en aire, colisiones y escalabilidad [12, 13].

La Tabla 3.2 presenta una comparación resumida de las tecnologías consideradas para el transporte de telemetría en el contexto PMM. La comparación se enfoca en aspectos relevantes para esta memoria, tales como el tamaño de payload, el tipo de infraestructura requerida, el consumo estimado y la pertinencia de cada tecnología para comunicaciones de baja tasa de datos.

Tecnología	Aspectos relevantes	Decisión para esta memoria
Wi-Fi	Alta tasa de datos, pero menor alcance relativo y mayor dependencia de infraestructura cercana.	Descartada como tecnología principal para telemetría LPWA.
Sigfox	Bajo consumo y baja tasa de datos, pero payload uplink limitado frente al mensaje de 24 bytes.	Descartada por requerir fragmentación o reducción del mensaje.
NB-IoT	Buena cobertura y confiabilidad celular, pero mayor dependencia de operador y mayor consumo estimado.	Considerada como alternativa, pero no seleccionada para la simulación principal.
LoRa/LoRaWAN	Bajo consumo, largo alcance, mensajes pequeños y posibilidad de evaluar SF7, SF8 y SF9.	Seleccionada como tecnología de referencia para la simulación.

Tabla 3.2: Comparación de tecnologías consideradas para telemetría PMM.

A partir de la Tabla 3.2, se observa que LoRa/LoRaWAN es la alternativa que mejor se ajusta al alcance de esta memoria, ya que permite trabajar con paquetes pequeños, baja tasa de transmisión y nodos distribuidos hacia un gateway. Sigfox queda limitado por el tamaño de payload, mientras que NB-IoT, aunque técnicamente viable, introduce una mayor dependencia de infraestructura de operador. Por esta razón, el modelo de simulación se concentra en LoRa/LoRaWAN.

3.3. Análisis preliminar de consumo energético

Como antecedente complementario para la selección tecnológica, se realizó una estimación preliminar de descarga de batería para un nodo IoT basado en LoRa y otro basado en NB-IoT. El análisis considera una transmisión periódica cada 30 segundos, una capacidad referencial de batería de 1000 mAh y valores de consumo horario previamente estimados para cada tecnología.

Esta evaluación no representa el consumo de un único paquete ni una medición experimental sobre dispositivos físicos. Corresponde a una proyección simplificada de descarga acumulada, construida bajo el supuesto de que el consumo horario se mantiene constante durante el periodo analizado. Los parámetros y el código utilizados para generar esta estimación se presentan en los Anexos N y O.

La Figura 3.1 presenta la evolución estimada de la carga restante de la batería para LoRa y NB-IoT bajo el mismo régimen periódico de transmisión. El eje horizontal representa el tiempo de operación en horas, mientras que el eje vertical indica la carga disponible de la batería en mAh.

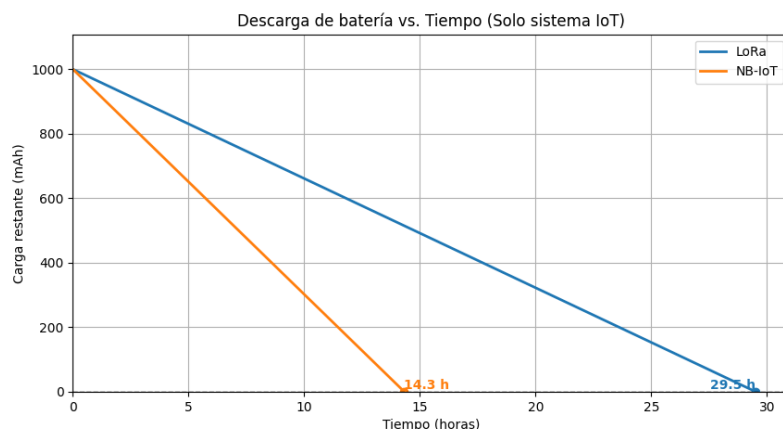


Figura 3.1: Estimación preliminar de descarga de batería para LoRa y NB-IoT con transmisión periódica cada 30 segundos.

Como se observa en la Figura 3.1, bajo los supuestos considerados, la batería asociada al nodo LoRa alcanza una duración estimada de aproximadamente 29.5 horas, mientras que el nodo NB-IoT alcanza cerca de 14.3 horas. Esto representa una duración estimada aproximadamente dos veces mayor para LoRa en el caso evaluado.

La diferencia observada se explica por el menor consumo horario asignado al sistema LoRa dentro del modelo preliminar. No obstante, este resultado no permite afirmar que LoRa presente siempre menor consumo que NB-IoT, ya que la duración real depende de factores como el módulo utilizado, la potencia de transmisión, la cobertura disponible, los estados de reposo, las retransmisiones, el establecimiento de conexión y la eficiencia de la batería.

Por lo tanto, la Figura 3.1 se utiliza únicamente como evidencia complementaria para apoyar la selección inicial de LoRa/LoRaWAN. La evaluación principal de esta memoria se concentra en el desempeño de la comunicación obtenido mediante simulación en OMNeT++/FLoRa, considerando entrega de paquetes, pérdidas, colisiones, sensibilidad y ocupación del canal.

3.4. LoRa/LoRaWAN en escenarios móviles

La literatura sobre LoRa/LoRaWAN muestra que su desempeño depende de la distancia, movilidad, obstrucciones, interferencia, densidad de nodos y configuración radio. En particular, el *Spreading Factor* influye directamente en la sensibilidad de recepción y en el *Time-on-Air*. Valores altos de SF pueden mejorar la robustez del enlace, pero también aumentan el tiempo de ocupación del canal, lo que puede elevar la probabilidad de colisiones en escenarios con más nodos [14].

En aplicaciones de movilidad, estos factores son relevantes porque los nodos no permanecen en posiciones fijas. Estudios sobre comunicaciones LoRa vehiculares muestran que la simulación permite explorar configuraciones de forma controlada, aunque sus resultados deben interpretarse considerando las limitaciones del modelo de propagación y la necesidad de validación experimental futura [15].

Estos antecedentes justifican que esta memoria evalúe escenarios estáticos y móviles, distintas densidades de nodos y valores de SF7, SF8 y SF9. Además, justifican el análisis conjunto de PDR/DER, pérdida de paquetes, colisiones, RSSI, SNIR, recepciones bajo sensibilidad, ocupación del canal y goodput.

3.5. Simulación de redes LoRa/LoRaWAN

La simulación es una herramienta útil para estudiar redes LoRa/LoRaWAN antes de realizar despliegues físicos. Permite controlar la cantidad de nodos, la movilidad, los parámetros físicos, el tráfico y las condiciones de propagación. En este contexto, OMNeT++ y FLoRa permiten modelar nodos LoRa, gateways, servidores de red y un medio inalámbrico, obteniendo métricas como paquetes enviados, paquetes recibidos, PDR/DER, colisiones, RSSI y SNIR [16, 17, 18].

Como parte de la búsqueda de una herramienta apropiada para el desarrollo experimental, se revisó el trabajo de Almuhaya et al. [19], en el cual se analizan distintas herramientas disponibles para la simulación de redes LoRa/LoRaWAN. Entre las alternativas estudiadas, se describe FLoRa como un *framework* basado en OMNeT++ y en componentes de INET. Este antecedente, junto con la posibilidad de representar nodos LoRa, gateways, servidores de red, movilidad y métricas de desempeño, contribuyó a seleccionar OMNeT++ junto con FLoRa como entorno de simulación para esta memoria.

El uso de simulación se ajusta al alcance de esta memoria, ya que permite comparar configuraciones de manera reproducible sin requerir un despliegue físico. No obstante, los resultados deben entenderse como una evaluación controlada del modelo y no como una caracterización definitiva de un entorno urbano real.

3.6. Brechas identificadas

A partir de la revisión anterior, se identifican las siguientes brechas relevantes para esta memoria:

- Las plataformas IoT de micromovilidad suelen describir arquitecturas completas, pero no profundizan en el desempeño de la capa LoRa/LoRaWAN bajo distintas configuraciones.
- La selección tecnológica debe considerar payload, periodicidad, consumo estimado, movilidad, densidad de nodos y dependencia de infraestructura.
- El payload de 24 bytes limita el uso directo de tecnologías con carga útil reducida, como Sigfox.
- NB-IoT es una alternativa relevante, pero debe contrastarse con LoRa/LoRaWAN en términos de consumo, infraestructura y tipo de tráfico.
- La selección del SF requiere evaluación específica, ya que afecta sensibilidad, tiempo en aire, colisiones y escalabilidad.
- En escenarios móviles no basta con analizar RSSI; también se deben evaluar PDR/DER, pérdida de paquetes, colisiones, SNIR y recepciones bajo sensibilidad.

3.7. Aporte de esta memoria

El aporte de esta memoria consiste en evaluar mediante simulación el desempeño de LoRa/LoRaWAN para telemetría mínima en micromovilidad compartida. El trabajo se enfoca en la capa de comunicación y analiza cómo varían las métricas de red bajo distintos valores de SF, condiciones de movilidad, densidad de nodos y patrones temporales de transmisión.

Capítulo 4

Modelo de Simulación y Diseño Experimental

Este capítulo describe el modelo utilizado para evaluar el desempeño de comunicaciones LoRa/LoRaWAN aplicadas a telemetría mínima en micromovilidad compartida. A diferencia de una arquitectura IoT productiva completa, el trabajo se concentra en la capa de comunicación y en su comportamiento bajo condiciones controladas de simulación. Para ello, se utiliza OMNeT++ junto con el *framework* FLoRa, modelando nodos LoRa, un gateway, un servidor de red y un medio inalámbrico con pérdida de trayectoria y variabilidad por *shadowing*. La selección de este entorno se apoyó en la revisión de herramientas de simulación LoRa/LoRaWAN presentada por Almuhaya et al. [19], además de su capacidad para representar los componentes, condiciones y métricas requeridos por el diseño experimental.

4.1. Descripción general del modelo

El sistema simulado representa una red LoRa/LoRaWAN simplificada para el envío de telemetría operacional desde vehículos de micromovilidad hacia una infraestructura central. Cada vehículo se modela como un nodo LoRa que genera paquetes periódicos de datos y los transmite directamente hacia un gateway. Posteriormente, el gateway reenvía los paquetes hacia el servidor de red mediante una conexión IP simulada.

La comunicación considerada corresponde exclusivamente al sentido *uplink*, es decir, desde los nodos hacia el gateway. No se considera comunicación nodo–nodo ni tráfico de actuación desde la red hacia los vehículos, debido a que el caso de uso analizado corresponde al monitoreo y no al control remoto. Esta decisión permite acotar el modelo y concentrar el análisis en la confiabilidad de la entrega de telemetría.

4.2. Justificación de la tecnología seleccionada

La selección de LoRa/LoRaWAN no se realizó de forma aislada. Como se expuso en el Capítulo 3, previamente se revisaron alternativas de conectividad aplicables al transporte de telemetría, considerando Wi-Fi, Sigfox, NB-IoT y LoRa/LoRaWAN. Esta revisión permitió comparar criterios como el tamaño de la carga útil, el consumo estimado, la cobertura, la dependencia de infraestructura, la movilidad, la confiabilidad y la factibilidad de evaluación mediante simulación.

A partir de dicha revisión, Wi-Fi fue descartado por no corresponder a una tecnología LPWA. Sigfox fue descartado debido a sus restricciones de carga útil frente al mensaje de 24 bytes definido, mientras que NB-IoT fue considerado como una alternativa celular relevante, aunque con una mayor dependencia de infraestructura de operador y un mayor consumo estimado bajo los supuestos analizados. En consecuencia, el modelo experimental se concentra en LoRa/LoRaWAN, debido a su compatibilidad con mensajes pequeños, bajas tasas de datos, comunicaciones *uplink* y nodos distribuidos que transmiten hacia un gateway.

4.3. Topología de red simulada

La topología base se compone de nodos LoRa, un gateway LoRa, un servidor de red y elementos de interconexión IP entre el gateway y el servidor. El gateway se ubica en el centro del área de simulación, mientras que los nodos pueden permanecer fijos o desplazarse según el escenario evaluado.

La Tabla 4.1 permite distinguir los elementos lógicos utilizados en la simulación. Los nodos LoRa representan los vehículos de micromovilidad, mientras que el gateway concentra las transmisiones inalámbricas y las reenvía hacia el servidor de red. Esta separación permite modelar el flujo de telemetría desde el vehículo hasta la infraestructura central, manteniendo el análisis enfocado en la capa de comunicación y no en la implementación completa de una plataforma IoT.

Componente	Función en la simulación
Nodo LoRa	Representa un vehículo de micromovilidad que transmite telemetría mínima.
Gateway LoRa	Recibe los paquetes transmitidos por los nodos y los reenvía hacia el servidor de red.
Servidor de red	Registra los paquetes recibidos y permite calcular métricas como DER/PDR.
Nube	Representa el enlace entre gateway y servidor de red mediante retardos configurados.

Tabla 4.1: Componentes principales de la topología LoRa/LoRaWAN simulada.

4.4. Justificación del diseño topológico

El diseño de topologías se definió de manera incremental para separar los efectos que intervienen en el desempeño de la red. En primer lugar, los escenarios E1 y E2 utilizan dos nodos y un gateway, permitiendo comparar una condición estática con una condición móvil sin introducir todavía problemas severos de densidad. Posteriormente, E3 incrementa la cantidad de nodos a diez dispositivos, lo que representa una primera aproximación a una operación con mayor concurrencia. Finalmente, E4 considera veinticinco nodos, con el propósito de evaluar el comportamiento del canal compartido bajo una carga más exigente.

Todas las topologías mantienen un gateway central para controlar la comparación entre escenarios. Esta decisión permite que las diferencias observadas se expliquen principalmente por la movilidad, la densidad, el SF y el patrón de transmisión, y no por cambios simultáneos en la infraestructura. Por lo tanto, las topologías no buscan representar una ciudad completa, sino un entorno urbano simplificado y reproducible que permita estudiar la escalabilidad de la comunicación LoRa/LoRaWAN.

4.5. Representación de las topologías evaluadas

Con el objetivo de ilustrar claramente la estructura de los escenarios analizados, las topologías se presentan mediante esquemas conceptuales agnósticos. Esta representación abstracta permite visualizar la disposición de los escenarios sin la carga gráfica propia del simulador, identificando de manera ordenada los nodos LoRa, el gateway central, la red IP y el servidor de red. Para asegurar la trazabilidad del trabajo, las capturas originales de la interfaz de OMNeT++/FLoRa se incluyen en el Anexo P como evidencia complementaria de la implementación.

4.5.1. Escenarios E1 y E2: dos nodos

La Figura 4.1 presenta la arquitectura utilizada para los escenarios E1 y E2. Ambos consideran dos nodos LoRa y un gateway ubicado en el centro del área de simulación. La diferencia entre ellos corresponde a la movilidad: E1 mantiene los nodos en posiciones estáticas, mientras que E2 permite su desplazamiento.

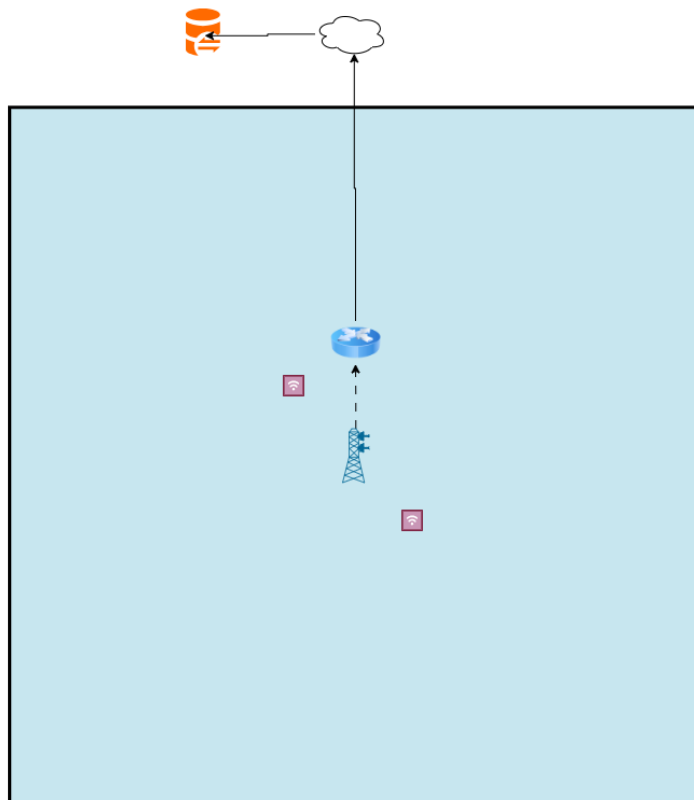


Figura 4.1: Representación de la topología utilizada para los escenarios E1 y E2.

La Figura 4.1 ilustra el flujo lógico de la información desde los dos nodos hacia el gateway y, posteriormente, hacia el servidor de red. Al mantener constante esta arquitectura, la diferencia entre E1 y E2 puede atribuirse principalmente a la incorporación de movilidad

La Tabla 4.3 resume las características que diferencian ambos escenarios.

Parámetro	Especificación
Escenarios	E1 y E2
Cantidad de nodos	2 nodos LoRa
Cantidad de gateways	1 gateway central
Movilidad	E1: estático; E2: móvil
Comunicación	Uplink desde los nodos hacia el gateway
Propósito experimental	Comparar una condición estática y una móvil manteniendo constante la densidad de nodos.

Tabla 4.3: Especificaciones de las topologías utilizadas en los escenarios E1 y E2.

La Figura 4.1 y la Tabla 4.3 muestran que ambos escenarios mantienen la misma infraestructura y cantidad de dispositivos. Por esta razón, la comparación entre E1 y E2 permite analizar el efecto de la movilidad sin introducir simultáneamente un cambio en la densidad de nodos.

4.5.2. Escenario E3: diez nodos móviles

La Figura 4.2 presenta la topología utilizada en el escenario E3. En este caso, diez nodos móviles comparten el medio LoRa y transmiten hacia un único gateway central.

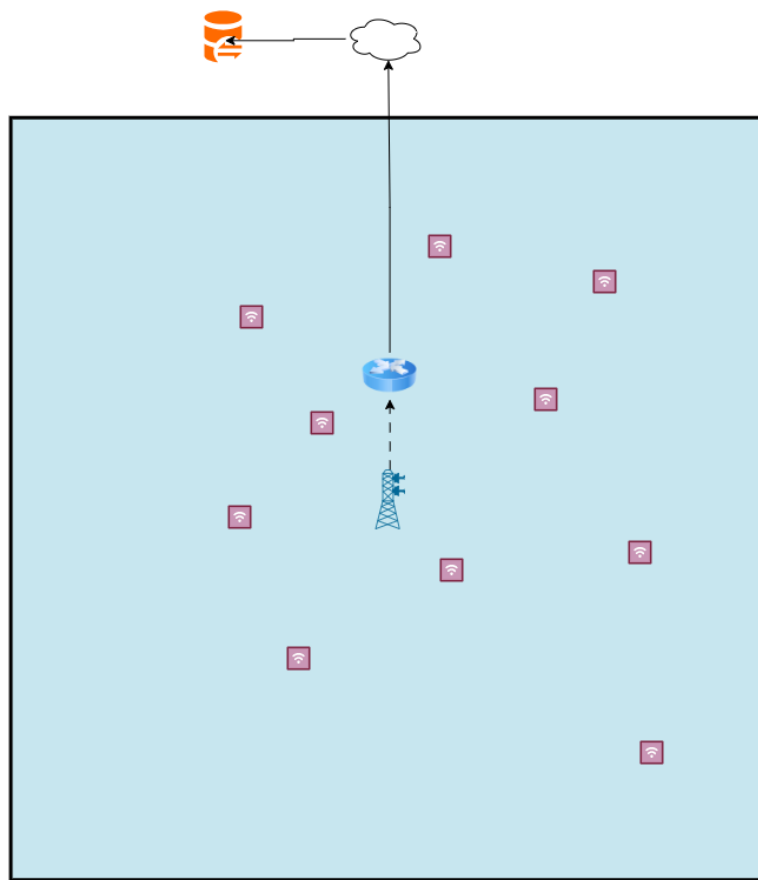


Figura 4.2: Representación de la topología utilizada para el escenario E3.

La Figura 4.2 muestra que los diez nodos comparten un único gateway y el mismo medio radioeléctrico. Esta configuración incrementa la concurrencia respecto de E1 y E2, permitiendo evaluar el efecto inicial de la densidad sobre el desempeño de la comunicación.

La Tabla 4.5 detalla las principales características del escenario.

Parámetro	Especificación
Escenario	E3
Cantidad de nodos	10 nodos LoRa
Cantidad de gateways	1 gateway central
Movilidad	Nodos móviles
Comunicación	Uplink desde los nodos hacia el gateway
Propósito experimental	Evaluar una primera condición de mayor concurrencia y densidad sobre el medio compartido.

Tabla 4.5: Especificaciones de la topología utilizada en el escenario E3.

Como muestran la Figura 4.2 y la Tabla 4.5, todos los dispositivos utilizan el mismo gateway y comparten el mismo medio radioeléctrico. El aumento a diez nodos permite observar cómo la mayor concurrencia afecta la entrega de paquetes, las colisiones y la ocupación del canal.

4.5.3. Escenario E4: veinticinco nodos móviles

La Figura 4.3 presenta la topología utilizada en el escenario E4, correspondiente a la condición de mayor densidad evaluada en esta memoria.

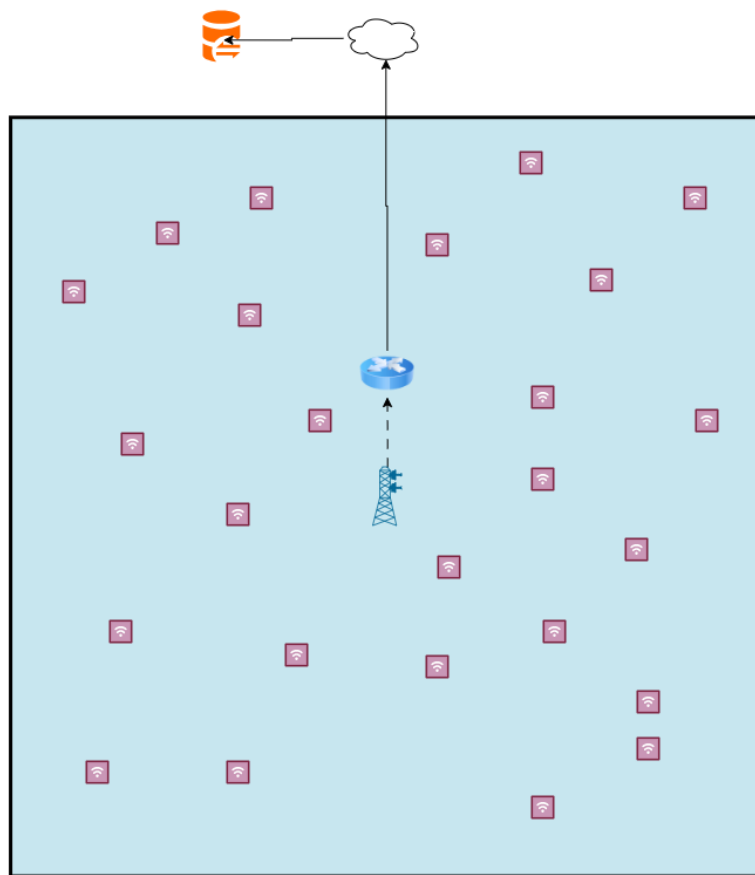


Figura 4.3: Representación de la topología utilizada para el escenario E4.

La Figura 4.3 muestra la condición de mayor densidad considerada en el diseño experimental. La presencia de veinticinco nodos transmitiendo hacia un único gateway permite estudiar el comportamiento del canal frente a una mayor carga agregada.

La Tabla 4.7 resume las principales características de este escenario.

Parámetro	Especificación
Escenario	E4
Cantidad de nodos	25 nodos LoRa
Cantidad de gateways	1 gateway central
Movilidad	Nodos móviles
Comunicación	Uplink desde los nodos hacia el gateway
Propósito experimental	Evaluar el comportamiento de la red bajo la mayor densidad y carga de transmisión consideradas.

Tabla 4.7: Especificaciones de la topología utilizada en el escenario E4.

La Figura 4.3 y la Tabla 4.7 muestran que E4 mantiene un único gateway, pero incrementa la cantidad de transmisores a veinticinco nodos. Esta condición permite estudiar cuándo la degradación deja de estar asociada principalmente a la calidad individual del enlace y comienza a estar condicionada por la capacidad del canal compartido y por el patrón temporal de transmisión.

En conjunto, las topologías representan una progresión desde una condición controlada de dos nodos hasta un escenario de veinticinco dispositivos móviles. Esta organización permite analizar por separado los efectos de movilidad y densidad, manteniendo constante la arquitectura central de comunicación.

4.6. Definición del paquete de telemetría

Para representar el caso de uso de micromovilidad compartida, se definió un mensaje de telemetría mínimo orientado al monitoreo operacional de cada vehículo. El objetivo de este mensaje es transportar solamente información esencial para identificar la unidad, ubicarla geográficamente y conocer su estado básico.

El tamaño del paquete se mantuvo acotado debido a que LoRa/LoRaWAN está orientado a comunicaciones de baja tasa de datos. La Tabla 4.8 presenta la estructura lógica considerada para el mensaje utilizado en la simulación.

Campo	Descripción	Tamaño
ID Scooter	Identificador único del vehículo	4 B
Timestamp	Marca temporal del dato transmitido	4 B
GPS Latitud	Coordenada geográfica de latitud	4 B
GPS Longitud	Coordenada geográfica de longitud	4 B
Acelerómetro	Lectura básica de movimiento en ejes X, Y y Z	6 B
Nivel de batería	Valor representativo del estado de batería	2 B
Total		24 B

Tabla 4.8: Estructura del paquete de telemetría utilizado en la simulación.

A partir de la Tabla 4.8, se verifica que el mensaje totaliza 24 bytes. La identificación del vehículo, la marca temporal y las coordenadas geográficas concentran la mayor parte de la carga útil, mientras que el acelerómetro y el nivel de batería completan la información mínima necesaria para representar su estado operacional. En FLoRa, este mensaje se configuró mediante el parámetro `dataSize = 24B`, sin depender de una codificación específica de aplicación.

4.7. Supuestos de tráfico

El diseño experimental consideró dos regímenes de tráfico. En primer lugar, se mantuvo una línea base con transmisiones cada 30 segundos, equivalente a 2880 paquetes por nodo durante un día de simulación. Este caso permite representar una configuración más exigente y sirve como referencia para observar pérdidas, colisiones y limitaciones de escalabilidad cuando varios nodos comparten el mismo medio.

En segundo lugar, se incorporó un conjunto de escenarios 1MIN asincrónicos con envío promedio cada 60 segundos. En estos casos, cada nodo fue configurado para transmitir 1440 paquetes por día. Además, se utilizó un desfase inicial y un intervalo aleatorio para evitar que los nodos transmitan de manera sincronizada o altamente correlacionada. En particular, se configuró `timeToFirstPacket = uniform(0s, 600s)` y `timeToNextPacket = uniform(45s, 75s)`, manteniendo un promedio operacional cercano a 60 segundos.

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 muestran el cálculo de paquetes por nodo para ambos regímenes.

$$N_{\text{paquetes},30\text{s}} = \frac{86400 \text{ s}}{30 \text{ s}} = 2880 \quad (4.1)$$

$$N_{\text{paquetes},60\text{s}} = \frac{86400 \text{ s}}{60 \text{ s}} = 1440 \quad (4.2)$$

La Tabla 4.10 muestra que ambas familias mantienen el mismo tiempo de simulación y tamaño de payload, pero se diferencian en la cantidad y distribución temporal de los envíos. La línea base genera una mayor carga mediante transmisiones cada 30 segundos, mientras que la configuración 1MIN reduce la cantidad de paquetes e incorpora un inicio aleatorio y jitter temporal. Esta comparación permite analizar el efecto de la carga ofrecida al canal sin modificar el contenido de la telemetría.

Parámetro	Base 30s	1MIN asincrónico
Tiempo de simulación	1 día	1 día
Tamaño del paquete	24 bytes	24 bytes
Periodicidad	30 s	Promedio 60 s
Paquetes por nodo	2880	1440
Primer envío	No aleatorizado	<code>uniform(0s, 600s)</code>
Intervalo entre envíos	30s	<code>uniform(45s, 75s)</code>
Tipo de tráfico	Uplink periódico	Uplink periódico asincrónico
Comunicación nodo–nodo	No considerada	No considerada

Tabla 4.10: Supuestos de tráfico utilizados en los escenarios simulados.

La Tabla 4.10 muestra que ambas configuraciones mantienen el mismo tiempo de simulación y tamaño de paquete, pero se diferencian en la cantidad y distribución temporal de los envíos. La línea base utiliza transmisiones fijas cada 30 segundos, mientras que la configuración 1MIN reduce la cantidad de paquetes e incorpora aleatoriedad tanto en el primer envío como en el intervalo entre transmisiones.

Cabe señalar que, debido al desfase inicial y al límite temporal exacto de un día, el número de paquetes efectivamente registrados como enviados en los archivos `.sca` puede variar levemente respecto del valor configurado. Sin embargo, metodológicamente los escenarios 1MIN se definen con 1440 paquetes por nodo.

4.8. Parámetros LoRa/LoRaWAN utilizados

Para aislar el efecto del *Spreading Factor*, se mantuvieron constantes los principales parámetros físicos del enlace. La frecuencia central se configuró en 915 MHz, el ancho de banda en 125 kHz, la tasa de codificación en 4/5 y la potencia de transmisión en 14 dBm. Además, se deshabilitó ADR para evitar que el simulador modificara automáticamente los parámetros durante la ejecución.

La Tabla 4.11 presenta los parámetros físicos y de operación que se mantuvieron constantes durante las simulaciones. Esta configuración común permite comparar los escenarios sin introducir variaciones adicionales en frecuencia, ancho de banda, tasa de codificación, potencia de transmisión o modelo de propagación.

Parámetro	Valor
Frecuencia central	915 MHz
Ancho de banda	125 kHz
Coding Rate	4/5
Potencia de transmisión	14 dBm
Payload	24 bytes
ADR	Deshabilitado
Modelo de propagación	LoRaLogNormalShadowing
Desviación shadowing	3.57

Tabla 4.11: Parámetros LoRa/LoRaWAN constantes utilizados en la simulación.

Como se observa en la Tabla 4.11, los parámetros físicos permanecieron constantes entre las ejecuciones, salvo el *Spreading Factor* asignado en cada configuración. En consecuencia, las diferencias observadas pueden relacionarse principalmente con el SF, la movilidad, la densidad de nodos y el patrón temporal de transmisión.

4.9. Justificación del rango de Spreading Factor evaluado

El análisis experimental se acotó a SF7, SF8 y SF9. Esta decisión se fundamenta en la relación entre el tamaño del *payload* definido y las restricciones de carga útil asociadas al perfil regional de referencia para 915 MHz.

En el plan regional US915/902–928 MHz, los enlaces *uplink* de 125 kHz asocian DR0 con SF10, DR1 con SF9, DR2 con SF8 y DR3 con SF7. Para este caso, DR0/SF10 permite un tamaño de carga útil de aplicación inferior al mensaje de 24 bytes definido en esta memoria, mientras que SF7, SF8 y SF9 permiten transportar dicho mensaje. Por ello, SF10, SF11 y SF12 no forman parte del análisis principal [20, 21].

La Tabla 4.12 compara la carga útil máxima de los *data rates* considerados con el mensaje de telemetría de 24 bytes definido para esta memoria.

Data Rate	Configuración	Payload máximo ref.	24 B
DR0	SF10 / 125 kHz	11 B	No viable
DR1	SF9 / 125 kHz	53 B	Viable
DR2	SF8 / 125 kHz	125 B	Viable
DR3	SF7 / 125 kHz	222 B	Viable

Tabla 4.12: Viabilidad del payload de 24 bytes según data rate de referencia en US915.

A partir de la Tabla 4.12, se observa que SF7, SF8 y SF9 permiten transportar el mensaje completo bajo el perfil regional considerado. En cambio, DR0/SF10 admite una carga útil inferior a 24 bytes, por lo que requeriría reducir o fragmentar la información. Esta restricción justifica que el diseño experimental principal se limite a SF7, SF8 y SF9.

4.10. Escenarios evaluados

Se definieron cuatro escenarios principales para evaluar el efecto combinado del SF, la movilidad y la densidad de nodos. Todos los escenarios consideran un solo gateway ubicado en el centro del área de simulación y comunicación directa nodo–gateway. La Tabla 4.13 resume los cuatro escenarios definidos para separar el efecto de la movilidad y de la densidad de nodos sobre el desempeño de la red.

Escenario	Descripción	Nodos	Movilidad	SF evaluados
E1	Línea base estática	2	No	7, 8, 9
E2	Línea base móvil	2	Sí	7, 8, 9
E3	Densidad baja móvil	10	Sí	7, 8, 9
E4	Densidad media móvil	25	Sí	7, 8, 9

Tabla 4.13: Escenarios de simulación evaluados.

La Tabla 4.13 permite distinguir dos comparaciones principales. E1 y E2 permiten evaluar el efecto de la movilidad manteniendo dos nodos, mientras que E2, E3 y E4 permiten analizar el efecto de incrementar progresivamente la densidad en escenarios móviles.

Además de las variantes con SF fijo, se incorporó una familia de escenarios con SF mixto. En estos casos, los nodos se distribuyen entre SF7, SF8 y SF9, con el objetivo de evaluar si la separación de configuraciones reduce la concentración de tráfico en un único SF.

La Tabla 4.14 resume las familias experimentales utilizadas.

Familia	Tráfico	Propósito
Base 30s	2880 paquetes/nodo, intervalo fijo de 30s	Línea base exigente para observar colisiones, pérdidas y escalabilidad.
1MIN asincrónico	1440 paquetes/nodo, promedio de 60s con jitter	Evaluar el efecto de reducir la carga y distribuir temporalmente las transmisiones.
1MIN con SF mixto	1440 paquetes/nodo, promedio de 60s con jitter y SF distribuido	Evaluar distribución de SF como estrategia complementaria.

Tabla 4.14: Familias experimentales utilizadas para comparar escenarios base y asincrónicos.

A partir de la Tabla 4.14, se distinguen tres condiciones experimentales: una línea base de mayor carga temporal, una configuración con menor frecuencia y transmisión asincrónica, y una variante que además distribuye los nodos entre distintos valores de SF. Esta organización permite separar el efecto de la periodicidad del efecto asociado a la asignación del *Spreading Factor*.

4.11. Configuración de movilidad

En los escenarios móviles se utilizó `RandomWaypointMobility`. Los nodos se desplazan dentro de un área de 1000 m por 1000 m, con velocidades dentro de un rango representativo de micromovilidad moderada. Para validar la configuración, se ejecutó un escenario corto denominado `TEST_MOVILIDAD_ES2_SF9`, activando vectores para la movilidad.

La revisión de los archivos `.vci` confirmó que el escenario fue configurado con `RandomWaypointMobility`, velocidad distinta de cero y `waitTime` igual a cero en la prueba. Sin embargo, el modelo utilizado no registró vectores de coordenadas `coordX/coordY` en los archivos de salida, por lo que la evidencia directa de trayectoria no quedó disponible en los resultados vectoriales. En consecuencia, el impacto de la movilidad se analiza mediante la comparación de métricas entre E1 y E2, y la verificación visual de desplazamiento queda como procedimiento de apoyo.

4.12. Métricas recolectadas

Las métricas fueron obtenidas desde archivos `.sca` generados por OMNeT++. La Tabla 4.15 resume las métricas utilizadas y su interpretación dentro del análisis.

Métrica	Interpretación
PDR/DER	Proporción de paquetes recibidos correctamente respecto de los enviados.
Pérdida de paquetes	Paquetes no recibidos correctamente por el sistema.
Colisiones	Eventos asociados a interferencia o solapamiento de transmisiones.
Bajo sensibilidad	Paquetes recibidos con potencia inferior al umbral de decodificación.
RSSI	Potencia promedio de señal recibida.
SNIR	Calidad de señal considerando ruido e interferencia.
Goodput	Tasa efectiva de datos útiles recibidos correctamente.
Ocupación del canal	Estimación del uso temporal del medio.

Tabla 4.15: Métricas utilizadas para evaluar el desempeño de la red.

La Tabla 4.15 muestra que la evaluación no se limita al PDR/DER. La pérdida de paquetes y las colisiones permiten analizar la confiabilidad y la competencia por el canal, mientras que RSSI, SNIR y las recepciones bajo sensibilidad aportan información sobre la calidad del enlace. Finalmente, la ocupación del canal y el *goodput* permiten relacionar la carga generada con el volumen efectivo de información útil recibido.

4.13. Limitaciones del modelo

El modelo desarrollado permite comparar configuraciones y escenarios de forma reproducible, pero presenta limitaciones. En primer lugar, no se realizó calibración con mediciones reales de terreno. En segundo lugar, el modelo se concentra en la comunicación uplink y no considera una arquitectura IoT productiva completa, por lo que quedan fuera elementos como aplicaciones de usuario, persistencia de datos, autenticación o lógica de negocio. Finalmente, los resultados dependen del modelo de propagación utilizado y de la interpretación interna de las métricas de colisión generadas por FLoRa.

Adicionalmente, los escenarios base con envío fijo cada 30 segundos deben interpretarse como una condición exigente y no necesariamente como la forma más adecuada de operar una red LoRa/LoRaWAN. Su utilidad principal es evidenciar cómo una configuración periódica y homogénea puede inducir pérdidas y colisiones, afectando la escalabilidad. Por esta razón, se incorporan escenarios 1MIN asincrónicos con envío promedio cada 60 segundos y distribución de SF.

Estas limitaciones no invalidan la comparación entre escenarios, pero deben ser consideradas al proyectar los resultados hacia un despliegue real. Por ello, la validación en terreno, la calibración del modelo, el uso de múltiples canales y la evaluación de ADR se proponen como trabajo futuro.

Capítulo 5

Resultados y Análisis Experimental

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en OMNeT++/FLoRa. El análisis se estructura en torno a las hipótesis definidas en el Capítulo 1 y utiliza como evidencia las métricas extraídas desde los archivos `.sca`. El propósito no es evaluar una plataforma IoT completa, sino determinar cómo varía el desempeño de la comunicación LoRa/LoRaWAN al modificar el *Spreading Factor*, la movilidad, la densidad de nodos y el patrón temporal de transmisión.

5.1. Metodología de evaluación

Para cada escenario se ejecutaron simulaciones con una duración equivalente a un día. El diseño experimental consideró tres familias de configuración, definidas para comparar el efecto de la frecuencia de transmisión, la distribución temporal de los envíos y la asignación del *Spreading Factor*.

La primera familia corresponde a la línea base con transmisión periódica cada 30 segundos, equivalente a 2880 paquetes configurados por nodo. La segunda considera escenarios 1MIN asincrónicos, con un envío promedio cada 60 segundos y jitter temporal, equivalentes a 1440 paquetes configurados por nodo. La tercera mantiene el mismo promedio de transmisión, pero distribuye los nodos entre distintos valores de SF.

La Tabla 5.2 presenta las tres familias experimentales consideradas, indicando el intervalo de transmisión, la cantidad de paquetes configurados por nodo y el propósito de cada una dentro del análisis.

Familia experimental	Intervalo	Paquetes por nodo	Uso en el análisis
Línea base 30s	30 s	2880	Condición periódica original, usada como referencia de mayor carga temporal.
1MIN asincrónico	Promedio 60 s	1440	Condición con inicio aleatorio y jitter temporal <code>uniform(45s, 75s)</code> .
1MIN con SF mixto	Promedio 60 s	1440	Condición asincrónica que además distribuye nodos entre SF7, SF8 y SF9.

Tabla 5.2: Familias experimentales consideradas en el análisis y cantidad de paquetes configurados por nodo para un día de simulación.

A partir de la Tabla 5.2, se observa que la línea base 30s representa la condición de mayor carga temporal, ya que duplica la cantidad de paquetes configurados respecto de las familias 1MIN. La segunda familia permite evaluar el efecto de reducir la frecuencia de transmisión e introducir asincronía, mientras que la tercera incorpora adicionalmente una distribución de SF. Esta organización permite separar el efecto del patrón temporal de transmisión del efecto asociado a la configuración radio.

El *payload* utilizado fue de 24 bytes. En las configuraciones con SF fijo se evaluaron SF7, SF8 y SF9. Para los escenarios con SF mixto se utilizaron combinaciones SF7/SF8 en los casos de dos nodos y SF7/SF8/SF9 en los escenarios de 10 y 25 nodos.

Las métricas principales consideradas fueron PDR/DER, pérdida de paquetes, tasa de colisiones y recepciones bajo sensibilidad. Como métricas complementarias se analizaron RSSI, SNIR, *Time-on-Air*, ocupación estimada del canal y *goodput* de *payload*. Estas métricas permiten diferenciar degradaciones asociadas a cobertura, sensibilidad, calidad de recepción y capacidad del medio compartido.

El *goodput* corresponde a la tasa efectiva de información útil recibida correctamente durante la simulación. Esta métrica se calculó a partir de la cantidad de paquetes recibidos correctamente, el tamaño del *payload* de 24 bytes y el tiempo total de simulación. De esta manera, complementa al PDR/DER al expresar el volumen efectivo de datos útiles recibido por unidad de tiempo.

Los escenarios 1MIN incorporaron un desfase inicial y un intervalo variable entre transmisiones. Para ello, se configuraron los siguientes parámetros:

- `timeToFirstPacket = uniform(0s, 600s)`: distribuye el inicio de las transmisiones durante los primeros 10 minutos de simulación.
- `timeToNextPacket = uniform(45s, 75s)`: mantiene un intervalo promedio cercano a 60 segundos e incorpora variación temporal entre transmisiones.

Debido al desfase inicial y al límite temporal exacto de un día, la cantidad de paquetes efectivamente enviados registrada en los archivos `.sca` puede ser levemente inferior al total teórico configurado. Por esta razón, el cálculo de PDR/DER se realizó utilizando la cantidad de paquetes efectivamente enviados por el simulador, siempre que esta métrica estuviera disponible.

5.2. Resultados de la línea base 30s

La Tabla 5.3 resume los resultados principales de la línea base con transmisión cada 30 segundos.

Esc.	Nodos	SF	PDR/DER (%)	Pérdida (%)	Col. (%)	Bajo sens. (%)	RSSI (dBm)	SNIR (dB)
ES1	2	SF7	10.61	89.39	58.40	30.99	-122.08	1.23
ES1	2	SF8	26.68	73.32	58.02	15.30	-124.11	1.35
ES1	2	SF9	39.46	60.54	57.73	2.81	-125.46	1.67
ES2	2	SF7	5.05	94.95	57.22	37.73	-122.46	1.15
ES2	2	SF8	18.04	81.96	57.67	24.29	-124.76	1.27
ES2	2	SF9	34.43	65.57	57.92	7.66	-126.48	1.46
ES3	10	SF7	9.99	90.01	90.01	0.00	-110.23	8.50
ES3	10	SF8	9.99	90.01	90.01	0.00	-110.23	9.86
ES3	10	SF9	9.99	90.01	90.01	0.00	-110.23	10.73
ES4	25	SF7	3.81	96.19	96.19	0.00	-109.87	3.06
ES4	25	SF8	2.93	97.07	97.07	0.00	-117.21	0.52
ES4	25	SF9	3.81	96.19	96.19	0.00	-109.87	3.29

Tabla 5.3: Resultados principales de la línea base con transmisión cada 30 segundos.

A partir de la Tabla 5.3, se observa que la línea base presenta una pérdida elevada de paquetes en todos los escenarios. En E1 y E2, correspondientes a condiciones de baja densidad, SF9 alcanza el mayor PDR/DER debido a su mayor robustez frente a señales débiles. Sin embargo, al aumentar la cantidad de nodos en E3 y E4, el rendimiento disminuye considerablemente y las diferencias entre SF tienden a reducirse, debido a que las altas tasas de colisión pasan a dominar el comportamiento de la red.

Estos resultados indican que el factor limitante cambia según la densidad. Con dos nodos, el desempeño se encuentra principalmente condicionado por la sensibilidad del enlace, mientras que en los escenarios de 10 y 25 nodos predomina la capacidad efectiva del canal compartido. Por lo tanto, bajo transmisiones periódicas cada 30 segundos, aumentar el SF no compensa por sí solo la mayor competencia por el medio.

5.3. Resultados de los escenarios 1MIN asincrónicos

La Tabla 5.4 presenta los resultados obtenidos en los escenarios 1MIN asincrónicos con SF fijo, considerando PDR/DER, pérdida, colisiones y recepciones bajo sensibilidad.

Esc.	Nodos	SF	PDR/DER (%)	Pérdida (%)	Col. (%)	Bajo sens. (%)	RSSI (dBm)	SNIR (dB)
ES1	2	SF7	12.08	87.92	0.00	87.92	-122.35	1.53
ES1	2	SF8	36.92	63.08	0.10	62.98	-124.55	1.95
ES1	2	SF9	68.24	31.76	0.52	31.23	-126.34	2.80
ES2	2	SF7	12.08	87.92	0.00	87.92	-122.35	1.53
ES2	2	SF8	36.92	63.08	0.10	62.98	-124.55	1.95
ES2	2	SF9	68.24	31.76	0.52	31.23	-126.34	2.80
ES3	10	SF7	16.57	83.43	0.67	82.76	-114.86	21.16
ES3	10	SF8	27.11	72.89	1.21	71.68	-119.10	25.06
ES3	10	SF9	45.16	54.84	2.53	52.32	-122.91	30.26
ES4	25	SF7	12.28	87.72	1.80	85.92	-117.03	13.05
ES4	25	SF8	22.54	77.46	3.19	74.27	-121.00	14.48
ES4	25	SF9	39.99	60.01	6.43	53.58	-124.32	16.03

Tabla 5.4: Resultados principales de los escenarios 1MIN asincrónicos con SF fijo.

A partir de la Tabla 5.4, se observa una mejora sustantiva respecto de la línea base. En E1, SF9 aumenta desde 12.08 % hasta 68.24 % de PDR/DER, mientras que en E2 aumenta desde 12.08 % hasta 68.24 %. En E3, el mejor resultado pasa desde 16.57 % hasta 45.16 %, y en E4 aumenta desde 12.28 % hasta 39.99 %. Estos resultados muestran que la reducción de la frecuencia de envío y la incorporación de asincronía disminuyen las colisiones y mejoran la entrega efectiva de paquetes.

Para sintetizar los resultados obtenidos, la Figura 5.1 contrasta el desempeño máximo alcanzado por las tres familias experimentales en los escenarios ES1, ES2, ES3 y ES4.

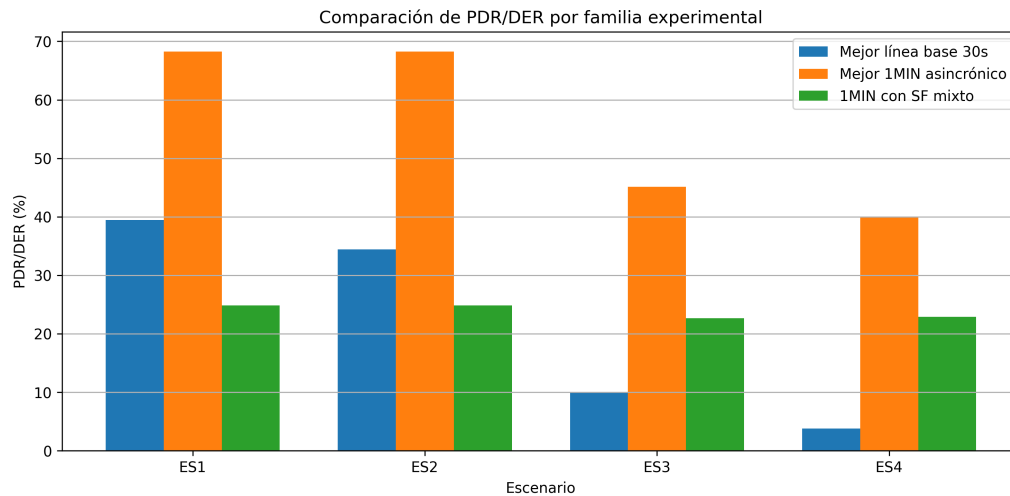


Figura 5.1: Mejor PDR/DER por escenario para la línea base de 30 s, la configuración asincrónica de 1 min y la configuración de 1 min con SF mixto.

Como se observa en la Figura 5.1, la configuración asincrónica de 1 min alcanza el mayor PDR/DER en los cuatro escenarios evaluados. En ES1 y ES2, la configuración con SF mixto presenta un rendimiento inferior al de la línea base de 30 s. Sin embargo, en ES3 y ES4 supera a dicha línea base, aunque permanece por debajo de la configuración asincrónica. Estos resultados indican que la separación temporal de las transmisiones tiene una influencia relevante sobre el desempeño de la red y que la utilización de SF mixtos, por sí sola, no compensa completamente los efectos derivados del acceso simultáneo al medio compartido.

5.4. Comparación directa entre línea base 30s y 1MIN asincrónico

Con el propósito de evaluar el efecto de la separación temporal entre transmisiones, la Tabla 5.5 contrasta los resultados obtenidos por la línea base de 30 s y la configuración asincrónica de 1 min, manteniendo constantes el escenario, la cantidad de nodos y el factor de propagación. Las diferencias se expresan en puntos porcentuales (p.p.) y se calculan como el resultado de la configuración de 1 min menos el obtenido por la línea base de 30 s. Por lo tanto, un valor positivo de Δ PDR representa una mejora en la entrega de paquetes, mientras que un valor negativo de Δ Col. indica una reducción de las colisiones.

Esc.	Nodos	SF	PDR 30s (%)	PDR 1MIN (%)	Δ PDR p.p.	Col. 30s (%)	Col. 1MIN (%)	Δ Col. p.p.
ES1	2	SF7	10.61	12.08	+1.47	58.40	0.00	-58.40
ES1	2	SF8	26.68	36.92	+10.23	58.02	0.10	-57.92
ES1	2	SF9	39.46	68.24	+28.78	57.73	0.52	-57.20
ES2	2	SF7	5.05	12.08	+7.03	57.22	0.00	-57.22
ES2	2	SF8	18.04	36.92	+18.88	57.67	0.10	-57.57
ES2	2	SF9	34.43	68.24	+33.82	57.92	0.52	-57.39
ES3	10	SF7	9.99	16.57	+6.59	90.01	0.67	-89.35
ES3	10	SF8	9.99	27.11	+17.13	90.01	1.21	-88.81
ES3	10	SF9	9.99	45.16	+35.17	90.01	2.53	-87.49
ES4	25	SF7	3.81	12.28	+8.47	96.19	1.80	-94.39
ES4	25	SF8	2.93	22.54	+19.61	97.07	3.19	-93.88
ES4	25	SF9	3.81	39.99	+36.18	96.19	6.43	-89.76

Tabla 5.5: Comparación directa entre la línea base 30s y los escenarios 1MIN asincrónicos para el mismo escenario y SF.

Como se observa en la Tabla 5.5, la configuración asincrónica de 1 min mejora el PDR en todas las combinaciones de escenario y factor de propagación evaluadas. Las diferencias más pronunciadas se registran con SF9, alcanzando incrementos de 28.78, 33.81, 35.17 y 36.18 puntos porcentuales en ES1, ES2, ES3 y ES4, respectivamente. En contraste, las mejoras obtenidas con SF7 son menores, aunque permanecen positivas en todos los escenarios.

La configuración asincrónica también reduce considerablemente el porcentaje de colisiones. Mientras que la línea base presenta valores cercanos al 58 % en ES1 y ES2, y superiores al 90 % en ES3 y ES4, la configuración de 1 min mantiene las colisiones entre 0.00 % y 6.43 %. La mayor reducción se observa en ES4 con SF7, donde las colisiones disminuyen en 94.39 puntos porcentuales. Estos resultados evidencian que la separación temporal de las transmisiones reduce la contención por el medio compartido y favorece una mayor entrega de paquetes, incluso en los escenarios con mayor cantidad de nodos.

La mejora obtenida mediante la separación temporal de las transmisiones es especialmente relevante cuando se utiliza SF9. La Figura 5.2 presenta la evolución del PDR/DER en función de la cantidad de nodos para la línea base de 30 s, las configuraciones asincrónicas de 1 min y la configuración de 1 min con SF mixto.

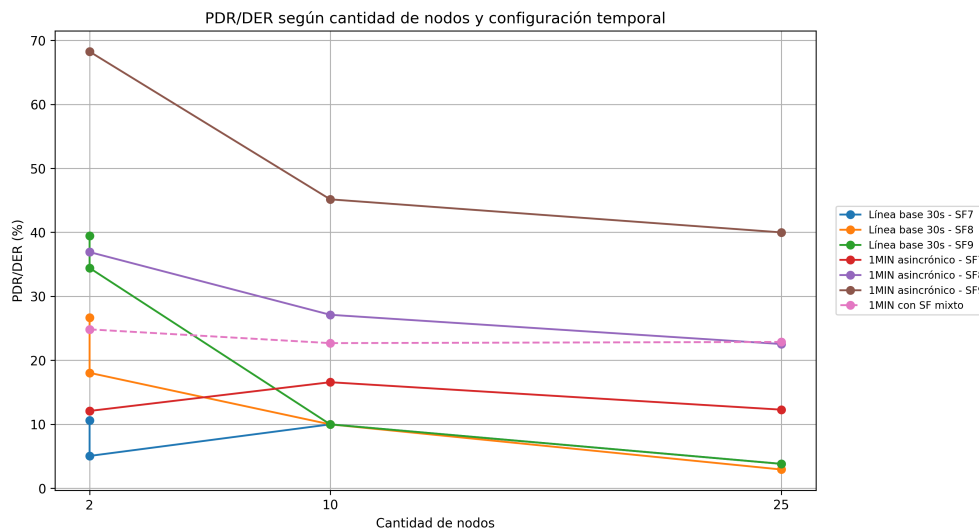


Figura 5.2: PDR/DER según cantidad de nodos para la línea base 30s, los escenarios 1MIN asincrónicos y los escenarios 1MIN con SF mixto.

Como se observa en la Figura 5.2, la configuración asincrónica de 1 min con SF9 alcanza el mayor PDR/DER para las tres cantidades de nodos evaluadas. Aunque su rendimiento disminuye al aumentar la cantidad de nodos, se mantiene ampliamente por encima de la línea base de 30 s con el mismo factor de propagación. La diferencia es particularmente notoria en los escenarios con 10 y 25 nodos, donde el rendimiento de la línea base con SF9 desciende a valores cercanos al 10 % y al 4 %, respectivamente, mientras que la configuración asincrónica conserva valores aproximados de 45 % y 40 %.

Las configuraciones con SF7 y SF8 presentan un rendimiento inferior al obtenido con SF9. En particular, SF8 muestra una disminución progresiva del PDR/DER a medida que aumenta la cantidad de nodos, mientras que SF7 presenta variaciones menos regulares. Por su parte, la configuración con SF mixto mantiene un rendimiento relativamente estable en los escenarios de mayor densidad, aunque permanece por debajo de la configuración asincrónica con SF9.

En conjunto, estos resultados indican que el bajo PDR/DER observado inicialmente no se explica solamente por las condiciones de cobertura. La frecuencia de transmisión y la contención por el canal compartido también influyen directamente en el desempeño de la red, especialmente cuando aumenta la cantidad de nodos.

5.5. Análisis de pérdida y colisiones

La pérdida de paquetes puede estar asociada a distintos factores, entre ellos las colisiones, las recepciones bajo el umbral de sensibilidad y las condiciones insuficientes para decodificar correctamente una trama. Por esta razón, además del PDR/DER, se analizaron por separado las tasas de colisión y de recepción bajo sensibilidad. La Figura 5.3 compara las tasas de colisión correspondientes a las mejores configuraciones de cada familia experimental en los escenarios ES1, ES2, ES3 y ES4.

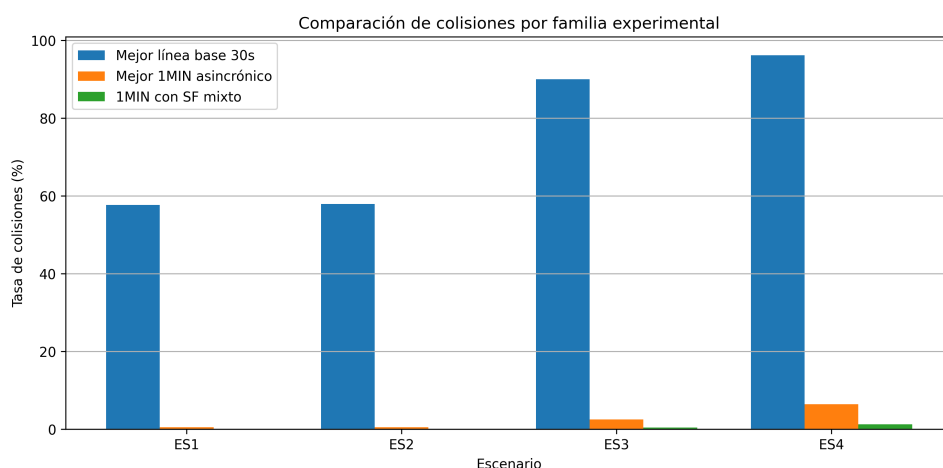


Figura 5.3: Comparación de colisiones entre la mejor configuración de la línea base 30s, la mejor configuración 1MIN asincrónica y los escenarios 1MIN con SF mixto.

Como se observa en la Figura 5.3, la línea base de 30 s presenta las mayores tasas de colisión en todos los escenarios evaluados. Estas alcanzan valores cercanos al 58 % en ES1 y ES2, y aumentan por sobre el 90 % en ES3 y ES4, evidenciando una mayor contención por el medio compartido a medida que crece la cantidad de nodos.

En contraste, la configuración asincrónica de 1 min reduce las colisiones a valores considerablemente menores en los cuatro escenarios. La configuración con SF mixto también mantiene tasas reducidas, aunque presenta un ligero aumento en los escenarios con mayor cantidad de nodos. Este comportamiento es consistente con el efecto de una menor frecuencia de transmisión, la distribución aleatoria de los instantes iniciales y la incorporación de jitter temporal, mecanismos que disminuyen la probabilidad de que

varias transmisiones coincidan en el canal.

Por lo tanto, la elevada pérdida de paquetes registrada en la línea base no puede atribuirse exclusivamente a condiciones de cobertura o sensibilidad. La comparación muestra que las colisiones constituyen un factor relevante, especialmente en ES3 y ES4, donde la mayor cantidad de nodos incrementa la ocupación y la competencia por el medio compartido.

La Figura 5.4 presenta la evolución de la tasa de colisiones según la cantidad de nodos y la configuración temporal utilizada.

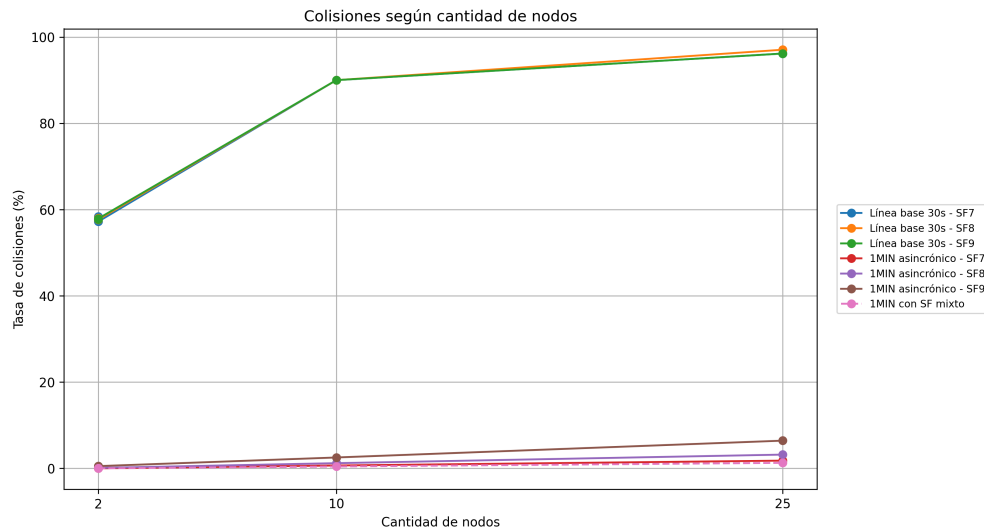


Figura 5.4: Tasa de colisiones según cantidad de nodos y configuración temporal.

Como se observa en la Figura 5.4, la línea base de 30 s presenta un aumento considerable de las colisiones en ES3 y ES4, asociado a la mayor cantidad de nodos. En contraste, las configuraciones de 1 min mantienen tasas reducidas, lo que evidencia el efecto favorable de una menor frecuencia de transmisión sobre la contención del canal.

La Figura 5.5 muestra la variación de la tasa de pérdida de paquetes según la cantidad de nodos y la configuración temporal.

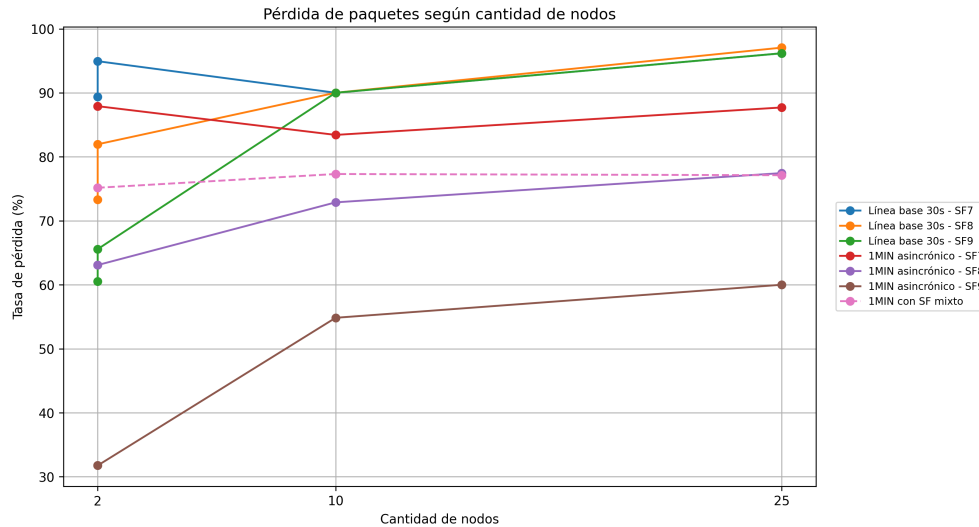


Figura 5.5: Tasa de pérdida de paquetes según cantidad de nodos y configuración temporal.

La Figura 5.5 evidencia que la disminución de las colisiones no elimina completamente la pérdida de paquetes. Las configuraciones con SF7 y SF8 mantienen tasas de pérdida elevadas, mientras que SF9 presenta el mejor desempeño general, lo que confirma su mayor adecuación para los escenarios evaluados.

5.6. Evaluación de escenarios 1MIN con SF mixto

La Tabla 5.7 resume los resultados obtenidos para los escenarios 1MIN con SF mixto. En estos casos se mantiene el patrón temporal asincrónico utilizado en los escenarios mitigados, pero los nodos se distribuyen entre distintos valores de *Spreading Factor* con el objetivo de reducir la concentración de tráfico sobre un único SF y disminuir potenciales eventos de colisión.

Esc.	Nodos	SF	PDR/DER (%)	Pérdida (%)	Col. (%)	Bajo sens. (%)	RSSI (dBm)	SNIR (dB)
ES1	2	SF7/SF8	24.83	75.17	0.00	75.17	-123.88	1.94
ES2	2	SF7/SF8	24.83	75.17	0.00	75.17	-123.88	1.94
ES3	10	SF7/SF8/SF9	22.68	77.32	0.44	76.88	-118.26	27.95
ES4	25	SF7/SF8/SF9	22.87	77.13	1.28	75.85	-121.62	8.64

Tabla 5.7: Resultados principales de los escenarios de 1 min con SF mixto.

A partir de la Tabla 5.7 se observa que los escenarios con SF mixto mantienen porcentajes de colisión relativamente bajos, especialmente en ES1 y ES2, donde no se registran colisiones. Sin embargo, el principal factor limitante continúa siendo la cantidad de paquetes recibidos bajo sensibilidad, situación que se refleja en valores de pérdida superiores al 75

En los escenarios de mayor densidad (ES3 y ES4) se aprecia un leve aumento de las colisiones respecto de los escenarios con dos nodos. No obstante, el impacto de las colisiones sigue siendo considerablemente menor que el asociado a las pérdidas por sensibilidad de recepción. Asimismo, los valores de RSSI y SNIR muestran diferencias entre escenarios, reflejando los efectos combinados de movilidad, distancia y configuración radio sobre la calidad del enlace.

La Tabla 5.8 compara el mejor resultado obtenido en la línea base de transmisión cada 30 segundos, el mejor resultado alcanzado por los escenarios 1MIN asincrónicos y el resultado correspondiente a la configuración con SF mixto.

Esc.	Nodos	30s SF/PDR	1MIN SF/PDR	SF mixto/PDR	Col. mixto (%)
ES1	2	SF9 / 39.46	SF9 / 68.24	SF7/SF8 / 24.83	0.00
ES2	2	SF9 / 34.43	SF9 / 68.24	SF7/SF8 / 24.83	0.00
ES3	10	SF7 / 9.99	SF9 / 45.16	SF7/SF8/SF9 / 22.68	0.44
ES4	25	SF7 / 3.81	SF9 / 39.99	SF7/SF8/SF9 / 22.87	1.28

Tabla 5.8: Comparación entre la mejor configuración de la línea base 30s, la mejor configuración 1MIN asincrónica y los escenarios 1MIN con SF mixto.

Como se observa en la Tabla 5.8, los escenarios 1MIN con SF mixto mejoran respecto de la línea base de transmisión cada 30 segundos en los escenarios de mayor densidad. Sin embargo, no logran superar el desempeño alcanzado por la configuración 1MIN con SF9 fijo, la cual presenta los mayores valores de PDR/DER en todos los escenarios evaluados.

Estos resultados sugieren que la simple distribución de nodos entre distintos valores de SF no garantiza una mejora global del rendimiento. Aunque la asignación heterogénea contribuye a reducir la concentración de tráfico sobre un único SF y mantiene niveles bajos de colisión, parte de los nodos opera con configuraciones menos robustas que SF9, lo que afecta la capacidad de recepción en condiciones de señal desfavorables.

En consecuencia, la distribución de SF debe interpretarse como un mecanismo complementario de gestión del canal y no como una solución universal para mejorar la entrega de paquetes. Para el caso de telemetría mínima analizado en esta memoria, los mejores resultados se obtienen mediante la combinación de transmisiones asincrónicas y configuraciones radio más robustas, particularmente aquellas basadas en SF9.

5.7. Análisis de recepciones bajo sensibilidad, RSSI y SNIR

El análisis de RSSI y SNIR se complementa con la revisión de recepciones bajo sensibilidad, ya que una señal recibida con potencia insuficiente puede impedir la decodificación del paquete aun cuando no existan colisiones relevantes. Por esta razón, estas métricas permiten diferenciar si la pérdida de paquetes se asocia principalmente a sensibilidad del enlace, interferencia o capacidad del canal compartido.

La Figura 5.6 presenta el porcentaje de recepciones bajo sensibilidad para las distintas configuraciones evaluadas. Esta métrica permite observar qué proporción de los paquetes no alcanza las condiciones mínimas de recepción requeridas por el modelo LoRa utilizado en la simulación.

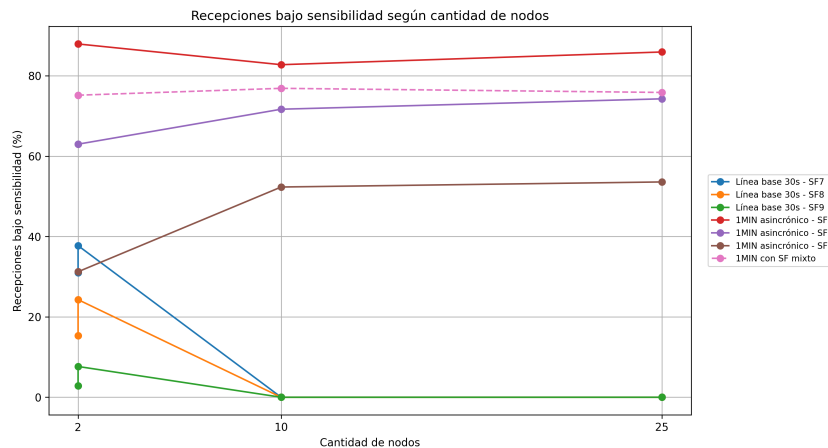


Figura 5.6: Recepciones bajo sensibilidad según cantidad de nodos y configuración temporal.

A partir de la Figura 5.6, se observa que, al disminuir las colisiones en los escenarios 1MIN, las recepciones bajo sensibilidad adquieren mayor relevancia relativa. Esto ocurre especialmente en SF7 y SF8, donde la menor sensibilidad respecto de SF9 reduce la entrega efectiva de paquetes. En consecuencia, la reducción de colisiones por sí sola no garantiza un mayor PDR/DER si la configuración radio no entrega suficiente robustez frente a señales débiles.

El RSSI debe interpretarse con precaución, ya que normalmente se calcula sobre recepciones observadas. Por ello, un RSSI promedio más alto no implica necesariamente mejor rendimiento global si la mayoría de los paquetes se pierde por colisiones, sensibilidad o condiciones de decodificación.

La Figura 5.7 presenta la relación entre RSSI promedio y PDR/DER para las familias experimentales consideradas.

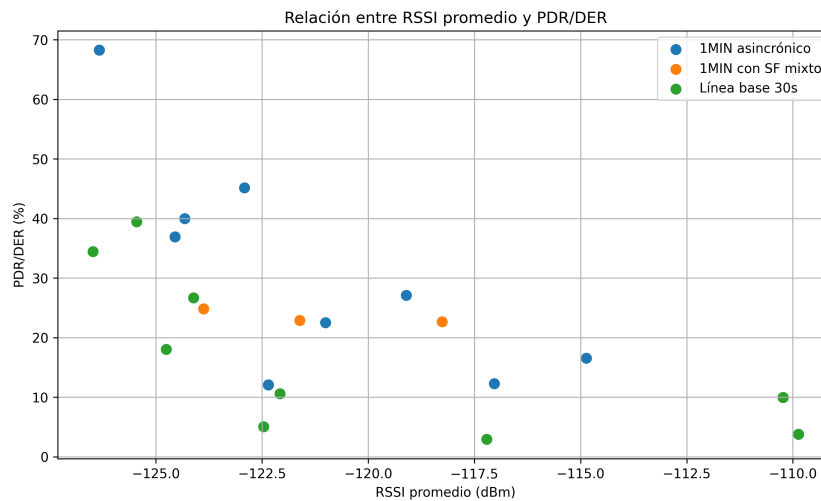


Figura 5.7: Relación entre RSSI promedio y PDR/DER.

Como se observa en la Figura 5.7, el RSSI no explica por sí solo el PDR/DER. En algunos escenarios, configuraciones con RSSI promedio más bajo obtienen una mejor entrega de paquetes, debido a la mayor sensibilidad asociada a valores de SF más altos. Por esta razón, el RSSI debe analizarse junto con SNIR, colisiones, recepciones bajo sensibilidad y PDR/DER.

La Figura 5.8 presenta la relación entre SNIR promedio y PDR/DER. Esta métrica complementa al RSSI, ya que incorpora el efecto del ruido y la interferencia sobre la calidad de recepción.

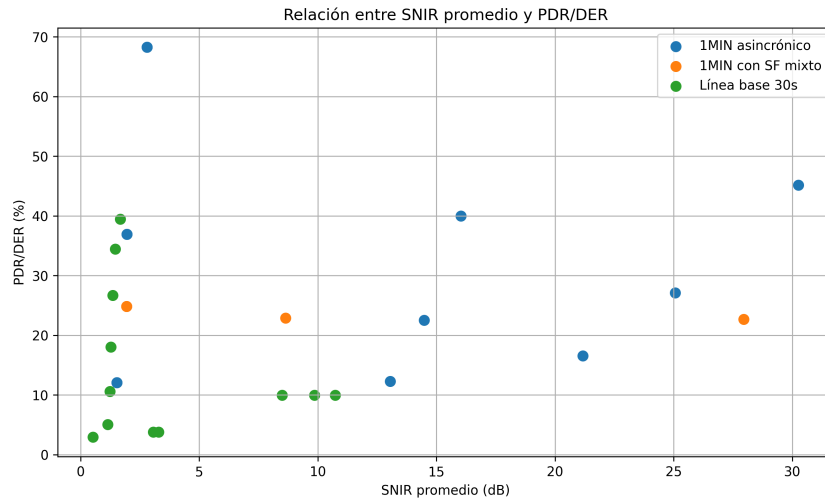


Figura 5.8: Relación entre SNIR promedio y PDR/DER.

La Figura 5.8 muestra que valores más altos de SNIR no siempre se traducen directamente en mayor PDR/DER, debido a que también influyen el SF utilizado, la sensibilidad de recepción, la densidad de nodos y el patrón temporal de transmisión. En conjunto, RSSI, SNIR y recepciones bajo sensibilidad permiten distinguir si la degradación observada se debe principalmente a cobertura, sensibilidad o capacidad efectiva del canal.

5.8. Ocupación estimada del canal y goodput

La ocupación estimada del canal permite aproximar el tiempo relativo durante el cual el medio se encuentra ocupado por transmisiones. Esta métrica se relaciona con el *Time-on-Air*, la cantidad de nodos y la cantidad de paquetes generados durante la simulación. El *goodput*, por otra parte, mide la tasa efectiva de payload recibido correctamente, por lo que permite complementar el análisis de PDR/DER con una estimación del volumen real de información útil entregada al servidor.

La Tabla 5.10 presenta configuraciones representativas de los escenarios 1MIN asincrónicos y 1MIN con SF mixto. En ella se comparan el PDR/DER, la ocupación estimada del canal, el *Time-on-Air* y el *goodput* de payload.

Esc.	Familia	SF	PDR/DER (%)	Ocup. canal (%)	ToA (ms)	Goodput (kbps)
ES1	1MIN asincrónico	SF9	68.24	0.68	205.82	0.0044
ES1	1MIN con SF mixto	SF7/SF8	24.83	0.29	87.38	0.0016
ES2	1MIN asincrónico	SF9	68.24	0.68	205.82	0.0044
ES2	1MIN con SF mixto	SF7/SF8	24.83	0.29	87.38	0.0016
ES3	1MIN asincrónico	SF9	45.16	3.41	205.82	0.0144
ES3	1MIN con SF mixto	SF7/SF8/SF9	22.68	1.84	111.05	0.0072
ES4	1MIN asincrónico	SF9	39.99	8.55	205.82	0.0319
ES4	1MIN con SF mixto	SF7/SF8/SF9	22.87	4.61	111.10	0.0182

Tabla 5.10: Ocupación estimada de canal, *Time-on-Air* y *goodput* de payload para configuraciones representativas.

A partir de la Tabla 5.10, se observa que las configuraciones 1MIN con SF9 presentan mayor *Time-on-Air* que los escenarios con SF mixto, pero también obtienen un PDR/DER y un *goodput* superiores. Esto indica que una menor ocupación del canal no implica necesariamente mejor desempeño si parte de los nodos utiliza SF menos robustos. En este caso, el mayor *goodput* se obtiene cuando la configuración radio favorece la recepción efectiva de paquetes.

La Figura 5.9 presenta la relación entre la ocupación estimada del canal y la tasa de colisiones para las familias experimentales evaluadas. Esta comparación permite observar cómo la carga temporal del medio se vincula con los eventos de colisión registrados durante la simulación.

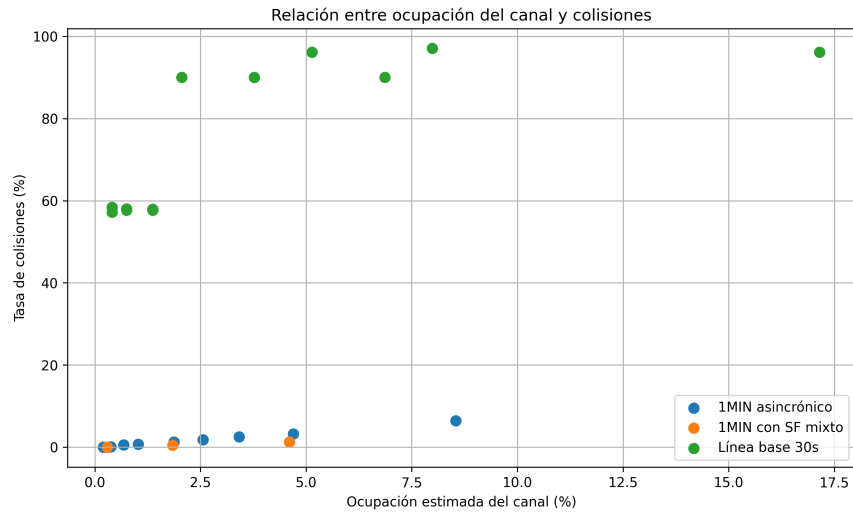


Figura 5.9: Relación entre ocupación estimada del canal y tasa de colisiones.

La Figura 5.9 muestra que la ocupación estimada del canal ayuda a explicar la exposición a colisiones, especialmente en la línea base de 30 segundos, donde se observan mayores tasas de colisión. En cambio, los escenarios 1MIN asincrónicos y 1MIN con SF mixto se concentran en valores de ocupación y colisión menores. No obstante, esta relación no debe interpretarse de forma aislada, ya que también influyen el SF utilizado, la movilidad, la sensibilidad de recepción y la distribución temporal de los envíos.

5.9. Validación de hipótesis

5.9.1. Validación de H1: efecto del Spreading Factor en baja densidad

La primera hipótesis plantea que, en escenarios de baja densidad, un mayor *Spreading Factor* mejora la entrega de paquetes debido a una mayor sensibilidad de recepción. En la línea base de 30 segundos, E1 aumenta desde 10.61 % en SF7 hasta 39.46 % en SF9. En la configuración 1MIN, E1 aumenta desde 12.08 % en SF7 hasta 68.24 % en SF9.

El mismo comportamiento se observa en E2. En la línea base, E2 aumenta desde 5.05 % en SF7 hasta 34.43 % en SF9, mientras que en 1MIN alcanza 68.24 % en SF9. Estos resultados confirman que SF9 ofrece mayor robustez en escenarios de baja densidad, especialmente cuando el patrón de transmisión evita colisiones excesivas. Por lo tanto, H1 se considera validada.

5.9.2. Validación de H2: impacto de la movilidad

La segunda hipótesis plantea que la movilidad degrada el desempeño respecto de un escenario estático equivalente. En la línea base de 30 segundos, E2 presenta menor PDR/DER que E1 para todos los SF evaluados. Por ejemplo, en SF9, E1 alcanza 39.46 %, mientras que E2 alcanza 34.43 %.

En los escenarios 1MIN, E1 y E2 obtienen valores equivalentes en las simulaciones disponibles. Esto indica que, bajo menor carga de canal y en las condiciones evaluadas, el efecto de la movilidad queda menos visible que en la línea base. Por ello, H2 se considera validada para la línea base de 30 segundos, pero queda parcialmente atenuada en los escenarios 1MIN asincrónicos.

5.9.3. Validación de H3: impacto de la densidad de nodos

La tercera hipótesis plantea que el aumento de la cantidad de nodos reduce el desempeño global de la red. En la línea base, el aumento de densidad provoca una degradación severa: E3 obtiene aproximadamente 9.99 % de PDR/DER y E4 cae a valores cercanos a 3 %–4 %.

Con la configuración 1MIN, la degradación por densidad sigue existiendo, pero se atenúa de forma importante. En SF9, E2 alcanza 68.24 %, E3 alcanza 45.16 % y E4 alcanza 39.99 %. Esto indica que el aumento de nodos sigue afectando la entrega, pero que una periodicidad menos agresiva mejora la escalabilidad respecto del caso base. Por lo tanto, H3 se considera validada.

5.9.4. Validación de H4: limitación de escalabilidad del canal compartido

La cuarta hipótesis plantea que, en escenarios de mayor densidad, la principal limitación deja de estar asociada exclusivamente a la sensibilidad de recepción y pasa a estar condicionada por la capacidad efectiva del canal compartido. Los resultados de la línea base validan esta hipótesis: E3 presenta aproximadamente 90 % de colisiones y E4 supera el 96 % en varias configuraciones.

Al pasar a 1MIN, las colisiones disminuyen de forma drástica. Por ejemplo, en E4-SF9 bajan desde 96.19 % a 6.43 %. Esto confirma que la configuración original generaba un colapso asociado al acceso al medio y a la concentración temporal de transmisiones. Al distribuir temporalmente las transmisiones, la pérdida restante se explica en mayor medida por recepciones bajo sensibilidad, especialmente en configuraciones de menor SF. Por lo tanto, H4 se considera validada y refinada.

5.10. Ranking técnico de configuraciones

A partir de los resultados obtenidos, la Tabla 5.11 presenta un ranking cualitativo de las configuraciones evaluadas. La clasificación prioriza el PDR/DER y considera, de manera complementaria, la pérdida de paquetes, las colisiones, las recepciones bajo sensibilidad, la ocupación del canal y el goodput.

Ranking	Configuración	Justificación
1	ES1/ES2, 1 min–SF9	Mayor PDR observado en baja densidad, alcanzando 68.24 %, con una baja tasa de colisiones.
2	ES3, 1 min–SF9	Mejor configuración con 10 nodos, con 45.16 % de PDR y una tasa de colisiones de 2.53 %.
3	ES4, 1 min–SF9	Mejor configuración con 25 nodos, con 39.99 % de PDR y una mejora sustantiva frente a la línea base.
4	ES3/ES4, 1 min con SF mixto	Reduce las colisiones, pero no supera a SF9 fijo debido al menor desempeño de los nodos configurados con SF7 y SF8.
5	Línea base de 30 s–SF9	Mejor alternativa dentro de la línea base en baja densidad, aunque limitada por una tasa elevada de colisiones.
6	Línea base de 30 s en alta densidad	Presenta saturación del canal, pérdidas superiores al 90 % y baja escalabilidad.

Tabla 5.11: Clasificación cualitativa de las configuraciones según su desempeño observado.

Como se observa en la Tabla 5.11, las configuraciones asincrónicas de 1 min con SF9 ocupan las primeras posiciones en todos los niveles de densidad. La configuración con SF mixto reduce las colisiones, pero no alcanza el rendimiento de SF9 fijo, mientras que la línea base de 30 s presenta el desempeño menos favorable en los escenarios con mayor cantidad de nodos.

5.11. Síntesis de validación de hipótesis

La Tabla 5.12 sintetiza el estado de las hipótesis planteadas a partir de los resultados obtenidos en los distintos escenarios experimentales.

Hipótesis	Resultado observado	Estado
H1	SF9 mejora PDR/DER frente a SF7 y SF8 en baja densidad, tanto en la línea base como en los escenarios 1MIN.	Validada
H2	La movilidad degrada el rendimiento en la línea base 30s; en 1MIN su efecto queda atenuado por la menor carga del canal.	Validada parcialmente
H3	El aumento de nodos reduce el PDR/DER, aunque el impacto se atenúa al pasar de 30s a 1MIN asincrónico.	Validada
H4	En la línea base predominan colisiones; en 1MIN las colisiones disminuyen y la pérdida restante se asocia más a sensibilidad y condiciones de enlace.	Validada y refinada

Tabla 5.12: Síntesis de validación de hipótesis.

Como muestra la Tabla 5.12, tres hipótesis fueron validadas y una fue validada parcialmente. Los resultados confirman la ventaja de SF9 y de la separación temporal de las transmisiones, además de identificar las colisiones como una causa relevante de degradación en la línea base. La validación parcial de H2 indica que el efecto de la movilidad no pudo aislarse completamente de la carga y de las condiciones del canal.

5.12. Conclusión parcial

Los resultados muestran que LoRa/LoRaWAN puede ser una alternativa viable para telemetría mínima en escenarios de baja densidad, especialmente utilizando SF9 y una periodicidad de transmisión moderada. La línea base con envío cada 30 segundos evidenció pérdidas severas y altas tasas de colisión, lo que limita la escalabilidad. Sin embargo, al reducir la frecuencia de envío a un promedio de 60 segundos y agregar jitter temporal, el DER mejora de forma sustantiva en todos los escenarios evaluados.

La configuración de SF mixto reduce las colisiones, pero no supera al mejor caso con SF9 fijo. Por ello, la estrategia más favorable observada corresponde a envío promedio cada 60 segundos con SF9, mientras que la distribución de SF debe considerarse como una alternativa complementaria que requiere asignación basada en calidad de enlace. En consecuencia, la limitación principal no es solamente la cobertura, sino también el patrón de acceso al medio y la carga ofrecida por los nodos.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

Esta memoria evaluó mediante simulación el desempeño de configuraciones LoRa/-LoRaWAN para el transporte de telemetría mínima en un contexto de micromovilidad compartida. El estudio se concentró en la capa de comunicación y utilizó OMNeT++ junto con FLoRa para modelar escenarios compuestos por nodos LoRa, un gateway, un servidor de red y mensajes con una carga útil de 24 bytes.

El alcance se delimitó deliberadamente a la simulación y al análisis de desempeño. Por esta razón, no se abordaron la implementación de hardware, firmware, backend, paneles de visualización ni aplicaciones móviles. Esta delimitación permitió estudiar cómo varía el comportamiento de la red frente al *Spreading Factor*, la movilidad, la cantidad de nodos y el patrón temporal de transmisión.

6.1. Conclusiones principales

La primera conclusión es que SF9 presentó el mejor desempeño entre las configuraciones con SF fijo evaluadas. En los escenarios de baja densidad, SF9 obtuvo mayores valores de PDR/DER que SF7 y SF8. Este comportamiento es coherente con las características de LoRa, debido a que un mayor *Spreading Factor* proporciona una mayor sensibilidad de recepción y permite decodificar señales más débiles, aunque también incrementa el *Time-on-Air*.

La segunda conclusión es que la línea base con transmisión periódica cada 30 s representa una condición exigente para el canal compartido. En esta familia experimental se observaron pérdidas elevadas y tasas de colisión especialmente altas en los escenarios con 10 y 25 nodos. Por lo tanto, los resultados de la línea base no deben interpretarse exclusivamente como una limitación de cobertura, sino también como una consecuencia de la carga ofrecida y de la concentración temporal de las transmisiones.

La tercera conclusión es que las configuraciones asincrónicas de 1 min mejoran de forma sustantiva el desempeño respecto de la línea base. Al pasar desde transmisiones periódicas cada 30 s a un envío promedio cada 60 s, con inicio aleatorio y variación temporal entre transmisiones, el PDR/DER aumenta en todos los escenarios evaluados y las colisiones disminuyen de forma marcada. Estos resultados muestran que la combinación de una menor carga ofrecida y una distribución temporal menos sincronizada favorece el desempeño de la red. Sin embargo, el diseño experimental no permite aislar completamente la contribución individual de la periodicidad, el desfase inicial y el jitter temporal.

La cuarta conclusión es que el aumento de la cantidad de nodos continúa afectando el rendimiento, incluso al utilizar transmisiones asincrónicas. En las configuraciones de 1 min con SF9 se obtiene el mejor desempeño observado, pero el PDR/DER disminuye al pasar desde los escenarios de dos nodos hacia los escenarios de 10 y 25 nodos. Esto indica que la configuración asincrónica mejora el comportamiento respecto de la línea base, pero no elimina las limitaciones propias de un canal compartido con un único gateway.

La quinta conclusión es que las configuraciones de 1 min con SF mixto reducen las colisiones, pero no superan el desempeño obtenido con SF9 fijo. La distribución de nodos entre SF7, SF8 y SF9 disminuye la concentración del tráfico en una única configuración radio; sin embargo, parte de los nodos utiliza valores de SF con menor sensibilidad que SF9. Por esta razón, el SF mixto debe considerarse como una estrategia complementaria cuya efectividad depende del criterio utilizado para asignar el SF a cada nodo.

Finalmente, RSSI y SNIR deben interpretarse como métricas complementarias. Un RSSI promedio de mayor magnitud no garantiza por sí solo un mejor PDR/DER, debido a que también intervienen las colisiones, la sensibilidad de recepción, la interferencia, la ocupación del canal y la configuración radio. Por ello, el desempeño debe evaluarse considerando conjuntamente el PDR/DER, la pérdida de paquetes, las colisiones, las recepciones bajo sensibilidad, RSSI, SNIR, la ocupación estimada del canal y el *goodput*.

6.2. Respuesta a la hipótesis general

La hipótesis general planteaba que la configuración del *Spreading Factor*, la movilidad, la cantidad de nodos y el patrón temporal de transmisión influyen en el desempeño de una red LoRa/LoRaWAN utilizada para telemetría mínima de micromovilidad compartida.

Los resultados obtenidos respaldan parcialmente esta hipótesis. El *Spreading Factor* mostró una influencia clara sobre la entrega de paquetes, especialmente en los escenarios de baja densidad, mientras que el aumento de la cantidad de nodos produjo una degradación relevante asociada a la competencia por el canal compartido. Asimismo, la combinación de una menor frecuencia de transmisión, un inicio aleatorio y jitter temporal redujo considerablemente las colisiones respecto de la línea base.

En cuanto a la movilidad, la línea base presentó un menor PDR/DER en ES2 respecto de ES1 para los tres valores de SF evaluados. Sin embargo, en las configuraciones de 1 min, ES1 y ES2 obtuvieron resultados equivalentes, por lo que no fue posible aislar completamente el efecto de la movilidad en esta familia experimental. En consecuencia, los resultados respaldan la influencia del SF, la cantidad de nodos y el patrón temporal, mientras que la influencia de la movilidad solo pudo observarse parcialmente bajo las condiciones evaluadas.

6.3. Recomendaciones técnicas

A partir de los resultados, se recomienda considerar SF9 en escenarios con condiciones semejantes a las evaluadas, particularmente cuando se requiera una mayor robustez frente a recepciones bajo sensibilidad. En ES1 y ES2, SF9 presentó el mayor PDR/DER entre las configuraciones con SF fijo. Esta recomendación no debe interpretarse como una selección universal, ya que un mayor SF también incrementa el tiempo de ocupación del canal.

Para escenarios con una mayor cantidad de nodos, no resulta suficiente aumentar el SF. En estos casos, se deben considerar mecanismos complementarios, como aumentar la cantidad de gateways, distribuir la carga entre canales, ajustar la periodicidad de transmisión, introducir aleatoriedad en los intervalos de envío o aplicar mecanismos de planificación que reduzcan la probabilidad de transmisiones simultáneas.

También se recomienda mantener acotado el tamaño de la carga útil. El mensaje de 24 bytes utilizado en esta memoria permite representar la telemetría mínima definida y es compatible con SF7, SF8 y SF9 bajo el perfil regional considerado. Los valores superiores de SF fueron excluidos del análisis principal debido a las restricciones de carga útil asociadas al perfil seleccionado.

La asignación de SF mixtos debería realizarse utilizando información sobre la calidad del enlace. Una distribución fija entre SF7, SF8 y SF9 reduce las colisiones, pero puede disminuir la entrega efectiva si algunos nodos quedan configurados con un SF insuficiente para sus condiciones de recepción. Por ello, una asignación basada en RSSI, SNIR, distancia o historial de entrega podría presentar mejores resultados que la distribución estática evaluada.

6.4. Limitaciones del estudio

La principal limitación de esta memoria es que los resultados provienen de simulaciones y no de mediciones realizadas en terreno. Aunque OMNeT++ y FLoRa permiten comparar configuraciones de manera controlada y reproducible, las condiciones reales de propagación urbana pueden incorporar obstrucciones, interferencias y variaciones que no son representadas completamente por el modelo utilizado.

Otra limitación corresponde a la interpretación de la métrica de colisiones generada por FLoRa. Los valores obtenidos deben analizarse como una métrica interna del simulador asociada a recepciones no exitosas por interferencia o condiciones de decodificación, y no necesariamente como un conteo exclusivo de transmisiones que se solapan completamente en el tiempo.

Adicionalmente, la comparación entre la línea base y las configuraciones de 1 min modifica simultáneamente la frecuencia de transmisión, la cantidad teórica de paquetes, el instante inicial y la variabilidad de los intervalos. Por esta razón, los resultados permiten evaluar el efecto conjunto de estas modificaciones, pero no cuantificar de manera independiente la contribución de cada una.

Asimismo, la movilidad fue configurada mediante `RandomWaypointMobility`. La revisión de la configuración confirmó que los escenarios móviles utilizan un modelo de desplazamiento; sin embargo, los archivos vectoriales no registraron directamente las coordenadas `coordX/coordY`. En consecuencia, el efecto de la movilidad se analizó principalmente mediante la comparación de las métricas obtenidas en ES1 y ES2. La equivalencia observada entre estos escenarios en las configuraciones de 1 min impide establecer una conclusión definitiva sobre la influencia de la movilidad en dicha familia experimental.

Finalmente, los escenarios evaluados consideran un único gateway, una cantidad máxima de 25 nodos y una selección acotada a SF7, SF8 y SF9. Por ello, los resultados no representan el límite absoluto de desempeño de LoRa/LoRaWAN, sino el comportamiento observado bajo las condiciones controladas y reproducibles definidas en esta memoria.

6.5. Trabajo futuro

Como trabajo futuro, se propone realizar una validación experimental en terreno utilizando hardware LoRa/LoRaWAN y mediciones reales de RSSI, SNIR, pérdida de paquetes y cobertura. Esta validación permitiría calibrar el modelo de propagación utilizado en la simulación y contrastar las tendencias observadas con el comportamiento de dispositivos reales.

También se propone incorporar trayectorias más representativas para los scooters dentro del modelo de movilidad. En esta memoria se utilizó un esquema de movilidad general para evaluar el efecto del desplazamiento, pero un trabajo posterior podría considerar rutas urbanas, zonas de detención, cambios de velocidad, puntos de origen y destino, o trayectorias basadas en datos reales de operación. Esto permitiría aproximar de mejor manera el comportamiento de vehículos de micromovilidad compartida en un entorno urbano.

Otra línea relevante consiste en revisar con mayor detalle los eventos de colisión reportados en los escenarios de dos nodos, especialmente en la línea base con transmisión cada 30 segundos. Dado que en estos casos se observaron tasas de colisión elevadas para una densidad reducida, resulta necesario analizar si dicho comportamiento se debe a sincronización temporal de transmisiones, configuración inicial de los nodos, parámetros del modelo MAC/físico de FLoRa, interpretación de las métricas $\cdot_{sca}$ o a otro factor propio del modelo de simulación. Esta revisión permitiría identificar el motivo de la anomalía y fortalecer la validez de la comparación entre escenarios.

Asimismo, se propone diseñar experimentos que permitan modificar de forma inde-

pendiente la periodicidad de transmisión, el desfase inicial y el jitter temporal. De esta manera, sería posible cuantificar la contribución individual de cada mecanismo sobre el PDR/DER, las colisiones, las recepciones bajo sensibilidad y la ocupación estimada del canal.

Otra línea de trabajo consiste en estudiar escenarios con múltiples gateways. Evaluar más de un punto de recepción permitiría determinar si la redundancia espacial mejora el PDR/DER, reduce las pérdidas y aumenta la capacidad de la red frente a una mayor cantidad de nodos.

Asimismo, se propone incorporar estrategias adaptativas de asignación de SF basadas en la calidad del enlace. Aunque el SF mixto no superó al SF9 fijo bajo la distribución evaluada, su desempeño podría mejorar si la selección se realiza considerando RSSI, SNIR, distancia al gateway, movilidad, historial de entrega de paquetes o condiciones particulares de cada nodo.

Finalmente, se propone estudiar intervalos de transmisión dependientes del estado del vehículo. En un despliegue real, la frecuencia de reporte podría variar según el movimiento, el nivel de batería, la criticidad del evento o la disponibilidad de la red. Esto permitiría reducir la carga del canal en condiciones normales y aumentar la frecuencia de transmisión solo cuando el estado operacional del scooter lo requiera.

Anexos

Los anexos presentan fragmentos relevantes del archivo de configuración utilizado en OMNeT++/FLoRa. Su objetivo es entregar trazabilidad del proceso experimental, diferenciando la configuración general de operación de los bloques específicos asociados a cada escenario. Las simulaciones fueron ejecutadas desde la interfaz de OMNeT++, seleccionando la configuración correspondiente a cada escenario y *Spreading Factor*.

Anexo A: Modelo de red NED utilizado

El Listado 6.1 presenta el modelo de red utilizado en OMNeT++ para representar la topología lógica de la simulación. Este modelo define los nodos LoRa, el gateway, el servidor de red y los elementos intermedios de comunicación IP simulada. La comunicación inalámbrica se realiza mediante LoRaMedium, mientras que el enlace entre el gateway y el servidor de red se representa mediante routers y una nube IP simulada. No se consideran enlaces nodo–nodo ni enlaces cableados entre nodos LoRa.

```
1 package flora.simulations;
2 import inet.networklayer.configurator.ipv4.Ipv4NetworkConfigurator;
3 import inet.node.inet.Router;
4 import inet.node.inet.StandardHost;
5 import inet.node.internetcloud.InternetCloud;
6 import inet.node.ethernet.Eth1G;
7 import flora.LoRaPhy.LoRaMedium;
8 import flora.LoraNode.LoRaNode;
9 import flora.LoraNode.LoRaGW;
10 //
11 // Red PMM para simulaciones LoRa/LoRaWAN.
12 // La comunicacion inalambrica nodo -> gateway se realiza mediante LoRaMedium.
13 // No existen enlaces nodo -> nodo.
14 // No existen enlaces cableados entre nodos LoRa.
15 // Topologia logica:
16 // loRaNodes[*] -- LoRaMedium --> loRaGW[0] --> gwRouter
17 // gwRouter --> internetCloud --> nsRouter --> networkServer
18 network LoRaNetworkPMM
19 {
20     parameters:
21         int numberOfNodes = default(2);
22         int numberOfGateways = default(1);
23         @display("bgb=1000,700");
24     submodules:
25         configurator: Ipv4NetworkConfigurator {
26             @display("p=900,80");
27         }
28         LoRaMedium: LoRaMedium {
29             @display("p=800,220");
30         }
31         networkServer: StandardHost {
32             @display("p=120,160");
```

```

33     }
34     nsRouter: Router {
35         @display("p=260,160");
36     }
37     internetCloud: InternetCloud {
38         @display("p=420,160");
39     }
40     gwRouter[numberOfGateways]: Router {
41         @display("p=520,360");
42     }
43     loRaGW[numberOfGateways]: LoRaGW {
44         @display("p=650,480");
45     }
46     loRaNodes[numberOfNodes]: LoRaNode {
47         @display("p=820,560");
48     }
49     connections allowunconnected:
50         // Network Server hacia router del servidor
51         networkServer.ethg++ <--> Eth1G <--> nsRouter.ethg++;
52         // Router del servidor hacia nube IP simulada
53         nsRouter.pppg++ <--> Eth1G <--> internetCloud.pppg++;
54         // Gateway LoRa hacia red IP simulada
55         for i=0..numberOfGateways-1 {
56             internetCloud.pppg++ <--> Eth1G <--> gwRouter[i].pppg++;
57             gwRouter[i].ethg++ <--> Eth1G <--> loRaGW[i].ethg++;
58         }
59     }

```

Código 6.1: Modelo NED de la red LoRa/LoRaWAN utilizada en la simulación.

La estructura presentada en el Listado 6.1 permite separar la comunicación inalámbrica LoRa del transporte IP simulado entre el gateway y el servidor de red. De esta forma, los nodos transmiten paquetes hacia el gateway mediante LoRaMedium, mientras que el gateway reenvía la información al servidor de red a través de la infraestructura IP definida en el modelo. El tamaño visual declarado en `@display("bgb=1000,700")` corresponde a la representación gráfica del escenario en la interfaz; el área efectiva de movimiento y simulación se definió posteriormente en el archivo `.ini`.

Anexo B: Configuración general de operación

El Listado 6.2 muestra la configuración base utilizada para todos los escenarios. En este bloque se define la red, el tiempo de simulación, la generación de resultados, el área de trabajo y los parámetros generales de ejecución.

```
1 [General]
2 network = flora.simulations.LoRaNetworkPMM
3 # Tiempo de simulacion
4 sim-time-limit = 1d
5 # Reproducibilidad
6 rng-class = "cMersenneTwister"
7 repeat = 1
8 # Ejecucion desde la interfaz de OMNeT++
9 cmdenv-express-mode = true
10 cmdenv-performance-display = true
11 cmdenv-status-frequency = 30s
12 record-eventlog = false
13 debug-on-errors = false
14 print-undisposed = false
15 # Archivos de salida
16 result-dir = ./PMM/results_vFINAL
17 output-scalar-file = ${resultdir}/${configname}-${runnumber}.sca
18 # Registro de resultados
19 **.vector-recording = false
20 **.scalar-recording = true
21 **.statistic-recording = true
22 # Area base de simulacion
23 **.constraintAreaMinX = 0m
24 **.constraintAreaMinY = 0m
25 **.constraintAreaMinZ = 0m
26 **.constraintAreaMaxX = 1000m
27 **.constraintAreaMaxY = 1000m
28 **.constraintAreaMaxZ = 0m
29 # Delay de la nube simulada
30 **.internetCloud.ipv4Delayer.config = xmldoc("./cloudDelays.xml")
31 **.ipv4Delayer.config = xmldoc("./cloudDelays.xml")
32 # No usar posiciones de la interfaz grafica
33 **.loRaNodes[*]**.initFromDisplayString = false
34 **.loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
```

Código 6.2: Configuración general de operación en OMNeT++/FLoRa.

Anexo C: Medio LoRa y modelo de propagación

El Listado 6.3 presenta la configuración del medio inalámbrico utilizado en la simulación. Se empleó un modelo con *shadowing* para representar variaciones propias de un entorno urbano simplificado.

```
1 # Medio LoRa y modelo de propagacion
2 **.radio.radioMediumModule = "LoRaMedium"
3 **.LoRaMedium.pathLossType = "LoRaLogNormalShadowing"
4 **.sigma = 3.57
5
6 **.minInterferenceTime = 0s
7 **.energyDetection = -110dBm
8
9 # Se aumenta para permitir transmisiones de mayor duracion
10 **.maxTransmissionDuration = 120s
11
12 LoRaNetworkPMM.**.radio.separateTransmissionParts = false
13 LoRaNetworkPMM.**.radio.separateReceptionParts = false
14
15 # Parametros LoRa constantes
16 **.loRaNodes[*]**.evaluateADRinNode = false
17 **.networkServer.**.evaluateADRinServer = false
18
19 **.loRaNodes[*]**.initialLoRaBW = 125kHz
20 **.loRaNodes[*]**.initialLoRaCR = 4
21 **.loRaNodes[*]**.initialLoRaTP = 14dBm
22
23 # Frecuencia de operacion
24 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].initialLoRaCF = 915MHz
25
26 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.centerFrequency = 915MHz
27 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.transmitter.centerFrequency = 915MHz
28 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.receiver.centerFrequency = 915MHz
29
30 LoRaNetworkPMM.loRaGW[*].LoRaGWNic.radio.centerFrequency = 915MHz
31 LoRaNetworkPMM.loRaGW[*].LoRaGWNic.radio.transmitter.centerFrequency = 915MHz
32 LoRaNetworkPMM.loRaGW[*].LoRaGWNic.radio.receiver.centerFrequency = 915MHz
```

Código 6.3: Configuración del medio LoRa y modelo de propagación.

Anexo D: Tráfico de telemetría

El Listado 6.4 muestra la configuración de la aplicación de tráfico LoRa utilizada como línea base. Para esta configuración se consideró una simulación de un día, con transmisiones cada 30 segundos. Por lo tanto, cada nodo generó 2880 paquetes durante la simulación.

```
1 # Aplicacion de trafico LoRa
2 **.loRaNodes[*].numApps = 1
3 **.loRaNodes[*].app[0].typename = "SimpleLoRaApp"
4 **.loRaNodes[*].app[0].destAddresses = "loRaGW[0]"
5
6 # Trafico periodico del scooter
7 # Cada nodo transmite telemetria cada 30 segundos
8 # 1 dia / 30 segundos = 2880 paquetes por nodo
9 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].numberOfPacketsToSend = 2880
10 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToNextPacket = 30s
11
12 # Payload operacional acotado
13 # ID + timestamp + latitud + longitud + bateria + aceleracion
14 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].dataSize = 24B
15
16 # Modelo de energia deshabilitado en la simulacion
17 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].LoRaNic.energySourceModule = ""
18 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energySourceModule = ""
```

Código 6.4: Configuración del tráfico de telemetría en la línea base.

Anexo E: Arquitectura gateway–servidor

El Listado 6.5 muestra la configuración utilizada para la comunicación entre el gateway LoRa y el servidor de red. En la simulación, los nodos transmiten directamente hacia el gateway, y este reenvía los paquetes al servidor de red.

```
1 # Gateway hacia network server
2 **.loRaGW[*].numUdpApps = 1
3 **.loRaGW[*].packetForwarder.localPort = 2000
4 **.loRaGW[*].packetForwarder.destPort = 1000
5 **.loRaGW[*].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
6
7 # Network server
8 **.networkServer.numApps = 1
9 **.networkServer.app[0].typename = "NetworkServerApp"
10 **.networkServer.app[0].localPort = 1000
11 **.networkServer.app[0].destPort = 2000
12 **.networkServer.app[0].destAddresses = "loRaGW[0]"
```

Código 6.5: Configuración de comunicación gateway–servidor.

Anexo F: Configuración base de escenarios

El Listado 6.6 presenta los escenarios base utilizados en la evaluación. Estos bloques definen la cantidad de nodos, la posición del gateway y el tipo de movilidad considerado. Posteriormente, cada escenario se extiende mediante configuraciones específicas para evaluar distintos valores de *Spreading Factor*.

```
1 # Escenario 1: 2 nodos estaticos, 1 gateway
2 [Config ES1_Static_2N_1GW]
3 extends = General
4 description = "ES1: Caso general estatico, 2 nodos, 1 gateway"
5
6 **.numberOfNodes = 2
7 **.numberOfGateways = 1
8
9 **.loRaGW[0]**.initialX = 500m
10 **.loRaGW[0]**.initialY = 500m
11 **.loRaGW[*].mobility.typename = "StationaryMobility"
12
13 **.loRaNodes[0]**.initialX = 300m
14 **.loRaNodes[0]**.initialY = 450m
15 **.loRaNodes[1]**.initialX = 700m
16 **.loRaNodes[1]**.initialY = 550m
17 **.loRaNodes[*].mobility.typename = "StationaryMobility"
18
19 # Escenario 2: 2 nodos moviles, 1 gateway
20 [Config ES2_Mobile_2N_1GW]
21 extends = ES1_Static_2N_1GW
22 description = "ES2: Caso general movil, 2 nodos, 1 gateway"
23
24 **.loRaNodes[*].mobility.typename = "RandomWaypointMobility"
25 **.loRaNodes[*].mobility.speed = uniform(2mps, 6mps)
26 **.loRaNodes[*].mobility.waitTime = uniform(0s, 10s)
27 **.loRaNodes[*].mobility.updateInterval = 1s
28
29 # Escenario 3: 10 nodos moviles, 1 gateway
30 [Config ES3_Mobile_10N_1GW]
31 extends = General
32 description = "ES3: Caso general densidad baja, 10 nodos moviles, 1 gateway"
33
34 **.numberOfNodes = 10
35 **.numberOfGateways = 1
```

```

36
37 **.loRaGW[0]**.initialX = 500m
38 **.loRaGW[0]**.initialY = 500m
39 **.loRaGW[*].mobility.typename = "StationaryMobility"
40
41 **.loRaNodes[*]**.initialX = uniform(100m, 900m)
42 **.loRaNodes[*]**.initialY = uniform(100m, 900m)
43
44 **.loRaNodes[*].mobility.typename = "RandomWaypointMobility"
45 **.loRaNodes[*].mobility.speed = uniform(2mps, 6mps)
46 **.loRaNodes[*].mobility.waitTime = uniform(0s, 10s)
47 **.loRaNodes[*].mobility.updateInterval = 1s
48
49 # Escenario 4: 25 nodos moviles, 1 gateway
50 [Config ES4_Mobile_25N_1GW]
51 extends = ES3_Mobile_10N_1GW
52 description = "ES4: Caso general densidad media, 25 nodos moviles, 1 gateway"
53
54 **.numberOfNodes = 25

```

Código 6.6: Configuración base de escenarios evaluados.

Anexo G: Configuración por Spreading Factor

Cada escenario base fue extendido para evaluar los valores de *Spreading Factor* SF7, SF8 y SF9. Estos valores fueron seleccionados debido a que permiten transmitir el *payload* de telemetría definido en esta memoria, correspondiente a 24 bytes.

No se consideran SF10, SF11 ni SF12 dentro del análisis principal, ya que el perfil regional utilizado como referencia presenta restricciones de tamaño de carga útil. En particular, SF10 soporta un máximo de 11 bytes para el caso considerado, por lo que no resulta compatible con el paquete de telemetría de 24 bytes definido para la simulación. Por esta razón, aunque el simulador permita configurar valores superiores de SF, estos no representan una condición operativa consistente con el *payload* declarado.

El Listado 6.7 muestra el patrón utilizado para extender el escenario E1 según el *Spreading Factor*. La misma estructura fue aplicada a los escenarios E2, E3 y E4.

```
1 [Config ES1_Static_2N_1GW_SF7]
2 extends = ES1_Static_2N_1GW
3 description = "ES1: Estatico, 2 nodos, 1 gateway, SF7"
4 **.loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 7
5
6 [Config ES1_Static_2N_1GW_SF8]
7 extends = ES1_Static_2N_1GW
8 description = "ES1: Estatico, 2 nodos, 1 gateway, SF8"
9 **.loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 8
10
11 [Config ES1_Static_2N_1GW_SF9]
12 extends = ES1_Static_2N_1GW
13 description = "ES1: Estatico, 2 nodos, 1 gateway, SF9"
14 **.loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 9
```

Código 6.7: Ejemplo de extensión de escenario por Spreading Factor evaluado.

Anexo H: Configuraciones 1MIN con transmisión asincrónica

El Listado 6.8 presenta las configuraciones 1MIN utilizadas para evaluar el efecto de distribuir temporalmente las transmisiones de los nodos. A diferencia de la línea base, donde cada nodo transmite cada 30 segundos, en estos escenarios cada nodo transmite en promedio cada 60 segundos, generando 1440 paquetes durante un día de simulación.

La configuración utiliza `timeToFirstPacket = uniform(0s, 600s)` para distribuir el inicio de las transmisiones dentro de los primeros 10 minutos, y `timeToNextPacket = uniform(45s, 75s)` para mantener un intervalo promedio de 60 segundos con variabilidad temporal. De esta forma, se evita que todos los nodos concentren sus envíos en el mismo instante hacia el gateway.

```
1 # =====
2 # ESCENARIOS 1MIN CON TRANSMISION ASINCRONICA
3 #
4 # Objetivo:
5 # Reducir la concentracion temporal de transmisiones mediante
6 # envio promedio cada 60 segundos y jitter.
7 #
8 # Configuracion comun:
9 # - sim-time-limit = 1d, heredado desde General.
10 # - 1 dia / 60 segundos = 1440 paquetes por nodo.
11 # - timeToFirstPacket aleatorio en los primeros 10 minutos.
12 # - timeToNextPacket con promedio de 60 segundos.
13 #
14 # Se usa jitter uniform(45s, 75s), cuyo promedio es 60s,
15 # evitando que todos los nodos vuelvan a sincronizarse.
16 # =====
17
18 # =====
19 # ES1_1MIN - Estatico asincronico: 2 nodos, 1 gateway
20 # =====
21
22 [Config ES1_1MIN_Static_2N_1GW]
23 extends = ES1_Static_2N_1GW
```

```

24 description = "ES1_1MIN: Estatico asincronico, 2 nodos, 1 gateway, envio promedio
    ↪ cada 60s"
25
26 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].numberOfPacketsToSend = 1440
27 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToFirstPacket = uniform(0s, 600s)
28 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToNextPacket = uniform(45s, 75s)
29
30 [Config ES1_1MIN_Static_2N_1GW_SF7]
31 extends = ES1_1MIN_Static_2N_1GW
32 description = "ES1_1MIN: Estatico asincronico, 2 nodos, SF7, 60s promedio"
33 **loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 7
34
35 [Config ES1_1MIN_Static_2N_1GW_SF8]
36 extends = ES1_1MIN_Static_2N_1GW
37 description = "ES1_1MIN: Estatico asincronico, 2 nodos, SF8, 60s promedio"
38 **loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 8
39
40 [Config ES1_1MIN_Static_2N_1GW_SF9]
41 extends = ES1_1MIN_Static_2N_1GW
42 description = "ES1_1MIN: Estatico asincronico, 2 nodos, SF9, 60s promedio"
43 **loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 9
44
45 # =====
46 # ES2_1MIN - Movil asincronico: 2 nodos, 1 gateway
47 # =====
48
49 [Config ES2_1MIN_Mobile_2N_1GW]
50 extends = ES2_Mobile_2N_1GW
51 description = "ES2_1MIN: Movil asincronico, 2 nodos, 1 gateway, envio promedio cada
    ↪ 60s"
52
53 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].numberOfPacketsToSend = 1440
54 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToFirstPacket = uniform(0s, 600s)
55 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToNextPacket = uniform(45s, 75s)
56
57 [Config ES2_1MIN_Mobile_2N_1GW_SF7]
58 extends = ES2_1MIN_Mobile_2N_1GW
59 description = "ES2_1MIN: Movil asincronico, 2 nodos, SF7, 60s promedio"
60 **loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 7
61
62 [Config ES2_1MIN_Mobile_2N_1GW_SF8]
63 extends = ES2_1MIN_Mobile_2N_1GW
64 description = "ES2_1MIN: Movil asincronico, 2 nodos, SF8, 60s promedio"

```

```

65 **loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = 8
66
67 [Config ES2_1MIN_Mobile_2N_1GW_SF9]
68 extends = ES2_1MIN_Mobile_2N_1GW
69 description = "ES2_1MIN: Movil asincronico, 2 nodos, SF9, 60s promedio"
70 **loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = 9
71
72 # =====
73 # ES3_1MIN - Densidad baja asincronica: 10 nodos moviles
74 # =====
75
76 [Config ES3_1MIN_Mobile_10N_1GW]
77 extends = ES3_Mobile_10N_1GW
78 description = "ES3_1MIN: 10 nodos moviles asincronicos, 1 gateway, envio promedio
    ↪ cada 60s"
79
80 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].numberOfPacketsToSend = 1440
81 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToFirstPacket = uniform(0s, 600s)
82 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToNextPacket = uniform(45s, 75s)
83
84 [Config ES3_1MIN_Mobile_10N_1GW_SF7]
85 extends = ES3_1MIN_Mobile_10N_1GW
86 description = "ES3_1MIN: 10 nodos moviles asincronicos, SF7, 60s promedio"
87 **loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = 7
88
89 [Config ES3_1MIN_Mobile_10N_1GW_SF8]
90 extends = ES3_1MIN_Mobile_10N_1GW
91 description = "ES3_1MIN: 10 nodos moviles asincronicos, SF8, 60s promedio"
92 **loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = 8
93
94 [Config ES3_1MIN_Mobile_10N_1GW_SF9]
95 extends = ES3_1MIN_Mobile_10N_1GW
96 description = "ES3_1MIN: 10 nodos moviles asincronicos, SF9, 60s promedio"
97 **loRaNodes[*]**.initialLoRaSF = 9
98
99 # =====
100 # ES4_1MIN - Densidad media asincronica: 25 nodos moviles
101 # =====
102
103 [Config ES4_1MIN_Mobile_25N_1GW]
104 extends = ES4_Mobile_25N_1GW
105 description = "ES4_1MIN: 25 nodos moviles asincronicos, 1 gateway, envio promedio
    ↪ cada 60s"

```

```

106
107 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].numberOfPacketsToSend = 1440
108 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToFirstPacket = uniform(0s, 600s)
109 LoRaNetworkPMM.loRaNodes[*].app[0].timeToNextPacket = uniform(45s, 75s)
110
111 [Config ES4_1MIN_Mobile_25N_1GW_SF7]
112 extends = ES4_1MIN_Mobile_25N_1GW
113 description = "ES4_1MIN: 25 nodos moviles asincronicos, SF7, 60s promedio"
114 **.loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 7
115
116 [Config ES4_1MIN_Mobile_25N_1GW_SF8]
117 extends = ES4_1MIN_Mobile_25N_1GW
118 description = "ES4_1MIN: 25 nodos moviles asincronicos, SF8, 60s promedio"
119 **.loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 8
120
121 [Config ES4_1MIN_Mobile_25N_1GW_SF9]
122 extends = ES4_1MIN_Mobile_25N_1GW
123 description = "ES4_1MIN: 25 nodos moviles asincronicos, SF9, 60s promedio"
124 **.loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = 9

```

Código 6.8: Configuraciones 1MIN con transmisión asincrónica y SF fijo.

Anexo I: Configuraciones 1MIN con SF mixto

El Listado 6.9 presenta las configuraciones 1MIN con SF mixto. Estas configuraciones mantienen el patrón de transmisión asincrónico descrito en el Anexo H, pero distribuyen los nodos entre distintos valores de *Spreading Factor*. El objetivo es evaluar si una asignación heterogénea de SF permite reducir la concentración de tráfico en una única configuración radio y mejorar el desempeño observado en términos de DER/PDR y colisiones.

En los escenarios con dos nodos se asignan SF7 y SF8. Para diez nodos, se distribuyen cuatro nodos en SF7, cuatro en SF8 y dos en SF9. Para veinticinco nodos, se asignan diez nodos a SF7, diez a SF8 y cinco a SF9.

```
1 # =====
2 # ESCENARIOS 1MIN CON SF MIXTO
3 #
4 # Objetivo:
5 # Evaluar si distribuir nodos en distintos Spreading Factors
6 # reduce la concentracion de trafico en un unico SF y mejora DER.
7 #
8 # Nota:
9 # Se mantiene el envio promedio cada 60 segundos con jitter.
10 # =====
11
12 # =====
13 # ES1_1MIN_MIXED - 2 nodos estaticos con SF7 y SF8
14 # =====
15
16 [Config ES1_1MIN_MIXED_SF_Static_2N_1GW]
17 extends = ES1_1MIN_Static_2N_1GW
18 description = "ES1_1MIN_MIXED: 2 nodos estaticos con SF7 y SF8, 60s promedio"
19
20 **.loRaNodes[0].**.initialLoRaSF = 7
21 **.loRaNodes[1].**.initialLoRaSF = 8
22
23 # =====
24 # ES2_1MIN_MIXED - 2 nodos moviles con SF7 y SF8
25 # =====
26
27 [Config ES2_1MIN_MIXED_SF_Mobile_2N_1GW]
```

```

28 extends = ES2_1MIN_Mobile_2N_1GW
29 description = "ES2_1MIN_MIXED: 2 nodos moviles con SF7 y SF8, 60s promedio"
30
31 **.loRaNodes[0]**.initialLoRaSF = 7
32 **.loRaNodes[1]**.initialLoRaSF = 8
33
34 # =====
35 # ES3_1MIN_MIXED - 10 nodos moviles con SF distribuido
36 # =====
37
38 [Config ES3_1MIN_MIXED_SF_Mobile_10N_1GW]
39 extends = ES3_1MIN_Mobile_10N_1GW
40 description = "ES3_1MIN_MIXED: 10 nodos moviles con SF distribuido, 60s promedio"
41
42 **.loRaNodes[0..3]**.initialLoRaSF = 7
43 **.loRaNodes[4..7]**.initialLoRaSF = 8
44 **.loRaNodes[8..9]**.initialLoRaSF = 9
45
46 # =====
47 # ES4_1MIN_MIXED - 25 nodos moviles con SF distribuido
48 # =====
49
50 [Config ES4_1MIN_MIXED_SF_Mobile_25N_1GW]
51 extends = ES4_1MIN_Mobile_25N_1GW
52 description = "ES4_1MIN_MIXED: 25 nodos moviles con SF distribuido, 60s promedio"
53
54 **.loRaNodes[0..9]**.initialLoRaSF = 7
55 **.loRaNodes[10..19]**.initialLoRaSF = 8
56 **.loRaNodes[20..24]**.initialLoRaSF = 9

```

Código 6.9: Configuraciones 1MIN con SF mixto.

Anexo J: Configuraciones evaluadas desde la interfaz

La ejecución de los escenarios se realizó desde la interfaz de OMNeT++, seleccionando manualmente la configuración correspondiente a cada escenario, patrón de transmisión y valor de *Spreading Factor*. Los nombres completos de las configuraciones se presentan en los Anexos G, H e I, por lo que en este anexo se resume la cantidad de ejecuciones realizadas por familia experimental.

Familia experimental	Ejecuciones	Descripción
Línea base 30s con SF fijo	12	Cuatro escenarios evaluados con SF7, SF8 y SF9. Cada nodo transmite cada 30 segundos, generando 2880 paquetes por nodo durante un día de simulación.
1MIN asincrónico con SF fijo	12	Cuatro escenarios evaluados con SF7, SF8 y SF9. Cada nodo transmite en promedio cada 60 segundos, con inicio aleatorio y jitter temporal, generando 1440 paquetes por nodo.
1MIN asincrónico con SF mixto	4	Cuatro escenarios evaluados con distribución de nodos entre distintos SF. Se mantiene el envío promedio cada 60 segundos con jitter temporal.
Total	28	Configuraciones ejecutadas para el análisis comparativo.

Tabla 6.2: Resumen de configuraciones ejecutadas desde la interfaz de OMNeT++.

Esta organización permite comparar tres condiciones experimentales. Primero, una línea base con transmisión periódica cada 30 segundos. Segundo, escenarios 1MIN con transmisión asincrónica y SF fijo. Tercero, escenarios 1MIN con transmisión asincrónica y SF mixto. De esta forma, el análisis permite observar el efecto de reducir la frecuencia promedio de transmisión, incorporar jitter temporal y distribuir los nodos entre distintos valores de *Spreading Factor*.

Anexo K: Configuración de prueba para validar movilidad

Para comprobar la configuración de movilidad se utilizó una simulación corta denominada TEST_MOVILIDAD_ES2_SF9. En esta prueba se aumentó la velocidad de los nodos y se configuró `waitTime = 0s`, con el objetivo de hacer más evidente el desplazamiento durante la ejecución visual desde la interfaz de OMNeT++.

```
1 [Config TEST_MOVILIDAD_ES2_SF9]
2 extends = ES2_Mobile_2N_1GW_SF9
3 description = "Validacion corta de movilidad en ES2"
4
5 sim-time-limit = 10min
6
7 **.vector-recording = false
8 **.loRaNodes[*].mobility.**.vector-recording = true
9
10 output-vector-file = ${resultdir}/${configname}-${runnumber}.vec
11 output-scalar-file = ${resultdir}/${configname}-${runnumber}.sca
12
13 **.loRaNodes[*].mobility.speed = uniform(5mps, 10mps)
14 **.loRaNodes[*].mobility.waitTime = 0s
15 **.loRaNodes[*].mobility.updateInterval = 1s
```

Código 6.10: Configuración corta utilizada para validar movilidad.

Anexo L: Métricas revisadas en los archivos de salida

Los resultados se revisaron desde los archivos `.sca` generados por OMNeT++/FLoRa. Las métricas consideradas se resumen en la Tabla 6.4. Estas permiten evaluar entrega de paquetes, intensidad de señal, calidad de recepción y eventos asociados a pérdida de tramas.

Métrica	Descripción
LoRa_NS_DER	Tasa de entrega observada en el servidor de red.
LoRa_GW_DER	Tasa de entrega observada a nivel de gateway.
totalReceivedPackets	Cantidad total de paquetes recibidos por el servidor de red.
sentPackets	Cantidad de paquetes enviados por cada nodo.
receivedRSSI	Intensidad de señal recibida, expresada en dBm.
minSnir	Relación señal a ruido e interferencia mínima observada.
numCollisions	Cantidad de eventos de colisión registrados en el receptor.
rcvBelowSensitivity	Cantidad de recepciones bajo el umbral de sensibilidad.
LoRaReceptionCollision:count	Contador de eventos de colisión LoRa.

Tabla 6.4: Métricas principales revisadas en los archivos `.sca`.

Anexo M: Observación sobre el registro de movilidad

Durante la validación, el archivo `.vci` confirmó que el escenario de prueba fue configurado con `RandomWaypointMobility`, velocidad distinta de cero y `waitTime = 0s`. Sin embargo, el modelo utilizado no generó vectores de coordenadas `coordX/coordY`. Por esta razón, la movilidad se documenta desde la configuración del escenario y su impacto se analiza a partir de la comparación de métricas entre escenarios estáticos y móviles.

```
jestej@simulator02:/Tesis/omnetpp-6.2.0/Tesis/flora$ grep -nE "vector .*loRaNodes.*(mobility|coordX|coordY|position|mobilityState|speed)" simul
ations/PMW/results_vFINAL/TEST_MOVILIDAD_ES2_SF9-0.vci
jestej@simulator02:/Tesis/omnetpp-6.2.0/Tesis/flora$ grep -iE "RandomWaypointMobility|mobility.speed|mobility.waitTime|constraintArea|initialX|i
nitialY" simulations/PMW/results_vFINAL/TEST_MOVILIDAD_ES2_SF9-0.vci
config **loRaGW[0]**.initialX 500m
config **loRaGW[0]**.initialY 500m
config **loRaNodes[0]**.initialX 400m
config **loRaNodes[0]**.initialY 400m
config **loRaNodes[1]**.initialX 600m
config **loRaNodes[1]**.initialY 600m
config **loRaNodes[*].mobility.typeName RandomWaypointMobility
config **loRaNodes[*].mobility.speed "uniform(5mps, 10mps)"
config **loRaNodes[*].mobility.waitTime 0s
config **loRaNodes[*].mobility.constraintAreaMinX 0m
config **loRaNodes[*].mobility.constraintAreaMinY 0m
config **loRaNodes[*].mobility.constraintAreaMinZ 0m
config **loRaNodes[*].mobility.constraintAreaMaxX 1000m
config **loRaNodes[*].mobility.constraintAreaMaxY 1000m
config **loRaNodes[*].mobility.constraintAreaMaxZ 0m
config **loRaNodes[*].mobility.typeName RandomWaypointMobility
config **loRaNodes[*].mobility.speed "uniform(2mps, 6mps)"
config **loRaNodes[*].mobility.waitTime "uniform(0s, 10s)"
config **loRaGW[0]**.initialX 500m
config **loRaGW[0]**.initialY 500m
config **loRaNodes[0]**.initialX 300m
config **loRaNodes[0]**.initialY 450m
config **loRaNodes[1]**.initialX 700m
config **loRaNodes[1]**.initialY 550m
config **constraintAreaMinX 0m
config **constraintAreaMinY 0m
config **constraintAreaMinZ 0m
config **constraintAreaMaxX 1000m
config **constraintAreaMaxY 1000m
config **constraintAreaMaxZ 0m
```

Figura 6.1: Validación de la configuración de movilidad en el archivo `.vci`.

La Figura 6.1 muestra la revisión realizada sobre el archivo `.vci`, donde se observa la configuración de `RandomWaypointMobility`, velocidades distintas de cero, `waitTime = 0s` y el área de desplazamiento configurada para los nodos móviles.

Anexo N: Análisis preliminar de consumo energético

Como complemento a la selección tecnológica, se desarrolló un análisis preliminar de consumo energético para comparar un nodo IoT basado en LoRa y un nodo IoT basado en NB-IoT. Este análisis no corresponde a una medición experimental ni a una simulación FLoRa, sino a una estimación basada en corrientes de operación, tiempo de transmisión, ciclo de trabajo y capacidad de batería.

El caso graficado corresponde a un régimen de transmisión periódica cada 30 segundos. Por lo tanto, no representa el consumo de un único paquete aislado, sino la proyección de descarga al repetir transmisiones durante el tiempo analizado. Si se quisiera analizar un único paquete, el resultado debería expresarse como energía o carga consumida por transmisión, por ejemplo en mAh por paquete o mJ por paquete, y no como una curva de descarga temporal.

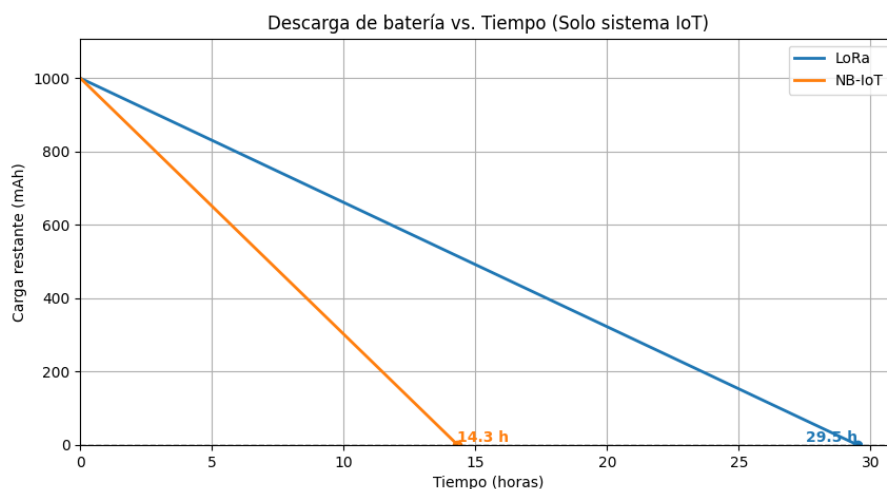


Figura 6.2: Estimación preliminar de descarga de batería para LoRa y NB-IoT con transmisión periódica cada 30 segundos.

El objetivo del análisis fue comparar de forma aproximada el impacto energético de ambas alternativas bajo un mismo esquema de telemetría periódica. Los resultados preliminares muestran que LoRa presenta un consumo estimado menor que NB-IoT bajo los supuestos considerados. Sin embargo, esta comparación debe interpretarse como una referencia metodológica y no como una caracterización definitiva de hardware real, ya que los valores dependen del módulo utilizado, la cobertura, el ciclo de transmisión, el estado de reposo y la capacidad efectiva de la batería.

Por esta razón, el análisis energético se utiliza solamente como apoyo para justificar la selección inicial de LoRa/LoRaWAN, mientras que la evaluación principal de la memoria se concentra en el desempeño de red obtenido mediante simulación.

Anexo O: Código utilizado para estimar consumo energético

El siguiente código fue utilizado para generar la estimación preliminar de descarga de batería presentada en el Anexo N. El caso corresponde a una transmisión periódica cada 30 segundos, por lo que la curva representa la descarga acumulada de batería bajo transmisiones repetidas durante el tiempo analizado.

Este código no forma parte del modelo de simulación implementado en OMNeT++/FLoRa. Su propósito es respaldar el análisis complementario de consumo energético utilizado para comparar, de forma preliminar, un nodo IoT basado en LoRa y un nodo IoT basado en NB-IoT.

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 # Parametros generales
4 T_ciclo = 30 # segundos
5 N_ciclos = int(3600 / T_ciclo) # 120 ciclos/hora
6 V_bat = 3.7 # Voltaje bateria (V)
7 Q_bat = 1000 # Capacidad bateria (mAh, 1Ah)
8 #Consumos horarios obtenidos antes
9 #(puedes ajustar aqui si cambias parametros)
10 Q_IoT_LoRa = 33.90 # mAh/h
11 Q_IoT_NBIOT = 69.84 # mAh/h
12 #Lifetime (horas)
13 lifetime_LoRa = Q_bat / Q_IoT_LoRa
14 lifetime_NBIOT = Q_bat / Q_IoT_NBIOT
15 # Vector de tiempo (horas)
16 t_max = int(max(lifetime_LoRa, lifetime_NBIOT)) + 2
17 t = np.linspace(0, t_max, 1000)
18 #Descarga de bateria (mAh) vs tiempo (h)
19 batt_lora = Q_bat - Q_IoT_LoRa * t
```

```

20 batt_nbiot = Q_bat - Q_IoT_NBIOT * t
21 plt.figure(figsize=(10, 5))
22 plt.plot(t, batt_lora, label='LoRa', color='tab:blue',
           linewidth=2)
23 plt.plot(t, batt_nbiot, label='NB-IoT', color='tab:orange',
           linewidth=2)
24 plt.axhline(0, color='k', linestyle='--', linewidth=1)
25 plt.title('Descarga de batería vs. Tiempo')
26 plt.xlabel('Tiempo (horas)')
27 plt.ylabel('Carga restante (mAh)')
28 plt.xlim(0, t_max)
29 plt.ylim(bottom=0)
30 plt.legend()
31 plt.grid(True)
32
33 #Puntos de agotamiento
34 plt.scatter([lifetime_LoRa], [0], color='tab:blue')
35 plt.scatter([lifetime_NBIOT], [0], color='tab:orange')
36 plt.text(lifetime_LoRa, 0, f'{lifetime_LoRa:.1f} h',
           va='bottom', ha='right', color='tab:blue',
           fontweight='bold')
37 plt.text(lifetime_NBIOT, 0, f'{lifetime_NBIOT:.1f} h',
           va='bottom', ha='left', color='tab:orange',
           fontweight='bold')
38
39 plt.show()

```

Código 6.11: Código Python utilizado para estimar la descarga de batería LoRa y NB-IoT.

Anexo P: Visualización de las topologías en OMNeT++/FLoRa

Las siguientes figuras presentan las topologías tal como fueron visualizadas desde la interfaz gráfica de OMNeT++/FLoRa. Estas capturas se incluyen como evidencia complementaria de la implementación del modelo. En el Capítulo 4 se utilizan diagramas simplificados y vectoriales para facilitar la interpretación de los componentes y del flujo de comunicación.

La Figura 6.3 muestra la visualización utilizada para los escenarios E1 y E2, compuestos por dos nodos LoRa, un gateway, una red IP simulada y un servidor de red.

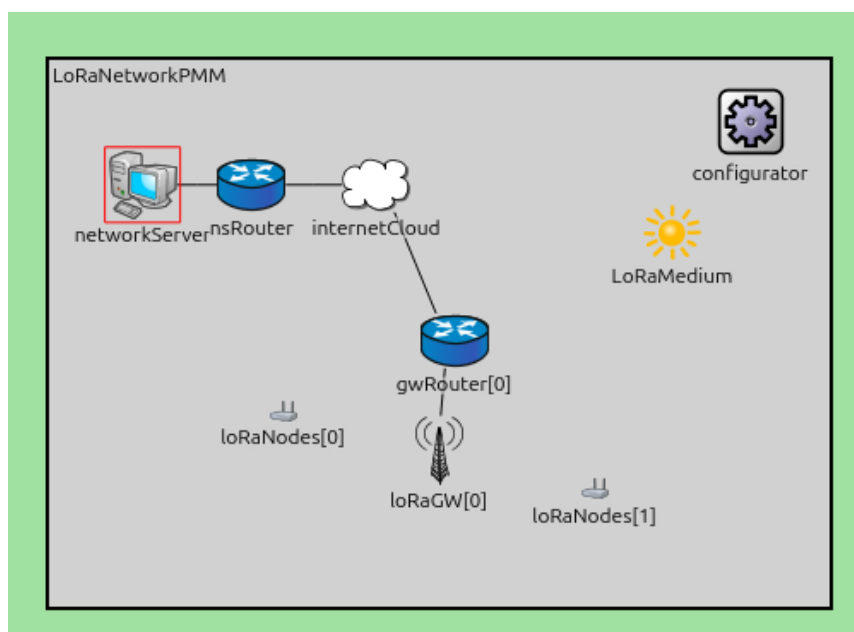


Figura 6.3: Visualización en OMNeT++/FLoRa de la topología utilizada para los escenarios E1 y E2.

un gateway central.

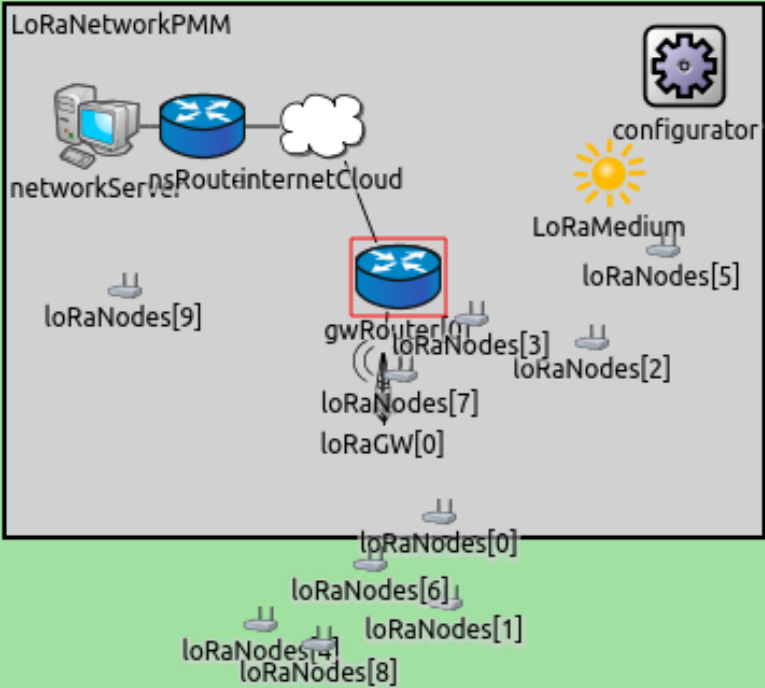


Figura 6.4: Visualización en OMNeT++/FLoRa de la topología utilizada para el escenario E3.

La Figura 6.5 presenta la visualización del escenario E4 con veinticinco nodos móviles y un gateway central.

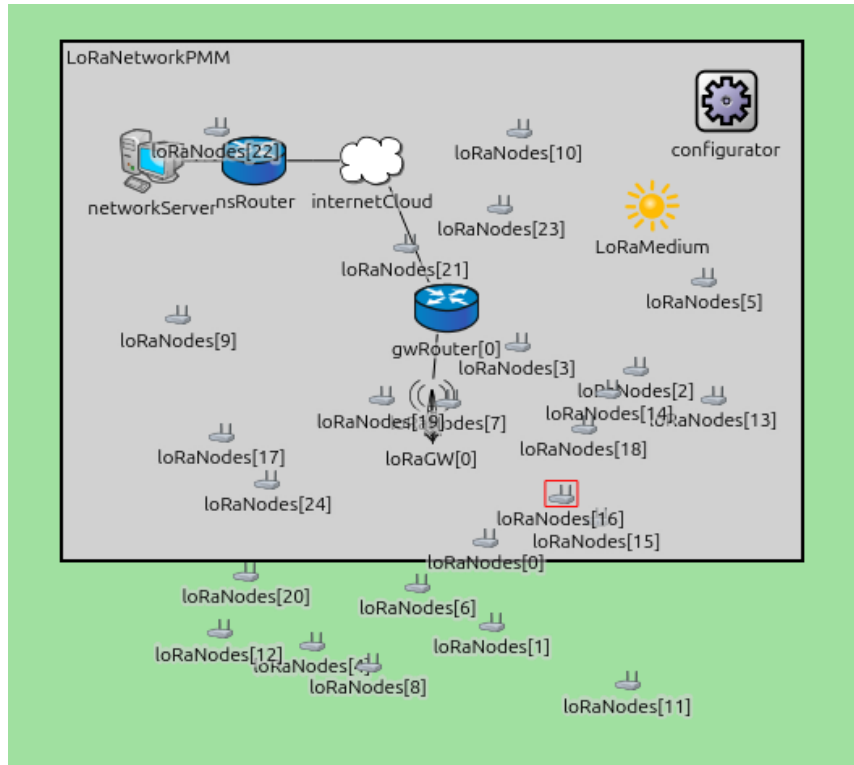


Figura 6.5: Visualización en OMNeT++/FLoRa de la topología utilizada para el escenario E4.

Las capturas permiten verificar que la cantidad de nodos y los componentes principales coinciden con las topologías descritas en el modelo de simulación. No obstante, debido a la superposición de nombres y elementos gráficos generados automáticamente por OMNeT++, se utilizaron representaciones vectoriales simplificadas en el cuerpo principal de la memoria.

Bibliografía

- [1] Forbes Chile. El boom de los scooters en Chile: es el país con mayor frecuencia de uso en América Latina, June 2026.
- [2] T13 / Ex-Ante. Scooters eléctricos: el nuevo mercado que domina la movilidad urbana en Chile y las cifras detrás, June 2026.
- [3] Enel X. La evolución de la movilidad eléctrica liviana en los últimos años, 2026.
- [4] The Clinic. A menos de un año de entrar en operación marca de scooters de Viña del Mar deja de funcionar: acusan robo del 80 % de su flota, January 2025.
- [5] Cristóbal Ignacio Caqueo Ledesma. Diseño e implementación de una plataforma IoT de monitoreo de vehículos de movilidad compartida. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, March 2025.
- [6] Alexandru-Viorel Palacean, Dumitru-Cristian Tranca, Cristian Contasel, Razvan Tataroiu, and Cristian Dutescu. IoT enabled optimized architectures for GPS anti-theft tracking devices. In *2021 20th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, pages 1–6, 2021.
- [7] Anna Mariya Joy, Aravind Ravi, Jestin Roy, G. V. Karthikeyan, and T. P. Rajan. IoT enabled electronic security & remote monitoring solution for electric bikes. In *2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*, pages 1–6, 2022.

- [8] Gizay Kisa Isik, Theo Tryfonas, and George Oikonomou. E-scooter sharing platforms: Understanding their architecture and cybersecurity threats. In *2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 5909–5916, 2023.
- [9] Sigfox. Payload. <https://build.sigfox.com/payload>, 2024.
- [10] Ramon Sanchez-Iborra, Luis Bernal-Escobedo, and Jose Santa. Eco-efficient mobility in smart city scenarios. *Sustainability*, 12(20):8443, 2020.
- [11] Ritesh Kumar Singh, Priyesh Puluckul, Rafael Berkvens, and Maarten Weyn. Energy consumption analysis of lpwan technologies and lifetime estimation for iot application. *Sensors*, 20(17):4794, 2020.
- [12] Jothi Prasanna Shanmuga Sundaram, Wan Du, and Zhiwei Zhao. A survey on lora networking: Research problems, current solutions, and open issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1):371–388, 2020.
- [13] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melia-Segui, and Thomas Watteyne. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):34–40, 2017.
- [14] Daniele Croce, Domenico Garlisi, Fabrizio Giuliano, Alice Lo Valvo, Stefano Mangione, and Ilenia Tinnirello. Performance of lora for bike-sharing systems. In *2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*, pages 1–6, 2019.
- [15] Fernando M. Ortiz, Thales T. de Almeida, Ana Elisa Ferreira, and Luis Henrique M. K. Costa. Experimental vs. simulation analysis of lora for vehicular communications. *Computer Communications*, 160:299–310, 2020.
- [16] András Varga and Rudolf Hornig. An overview of the omnet++ simulation environment. In *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools*

and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, pages 1–10, 2008.

- [17] Sadiq Idris, Thenuka Karunathilake, and Anna Förster. Survey and comparative study of lora-enabled simulators for internet of things and wireless sensor networks. *Sensors*, 22(15):5546, 2022.
- [18] FLoRa. Flora: A framework for lora simulations with omnet++. <https://flora.aalto.fi/>, 2025.
- [19] Mukarram A. M. Almuahaya, Waheb A. Jabbar, Noorazliza Sulaiman, and Suliman Abdulmalek. A survey on lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions. *Electronics*, 11(1):164, 2022.
- [20] LoRa Alliance. Rp002-1.0.5 lorawan regional parameters. Technical report, LoRa Alliance, 2025.
- [21] The Things Network. Us902-928 mhz band. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/us915/>, 2025.