

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de  
Telecomunicación



COMUNICACIONES INALÁMBRICAS  
AVANZADAS APLICADAS AL  
TRANSPORTE FERROVIARIO

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Ana María González Plaza**

Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas y Servicios para la Sociedad  
de la Información

Master de Sciences, Technologies, Sante Mention Informatique

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de  
Telecomunicación

**Doctorado en Ingeniería de Sistemas y Servicios para la Sociedad  
de la Información**

# **COMUNICACIONES INALÁMBRICAS AVANZADAS APLICADAS AL TRANSPORTE FERROVIARIO**

## **TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Ana María González Plaza**

Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas y Servicios para la Sociedad  
de la Información

Master de Sciences, Technologies, Sante Mention Informatique

Bajo la dirección de:  
Dr. César Briso Rodríguez

Madrid, 2024

Título: COMUNICACIONES INALÁMBRICAS AVANZADAS APLICADAS AL TRANSPORTE FERROVIARIO

Autor: Ana María González Plaza

Programa de Doctorado: Ingeniería de Sistemas y Servicios para la Sociedad de la Información

Dirección de Tesis:

Dr. César Briso Rodríguez, Catedrático en Universidad Politécnica de Madrid

Revisores Externos:

Tribunal de Tesis:

Fecha de Defensa de Tesis:



*No habrá progreso si no es de todos y para todos.*

Silo, 1994.

Esta tesis es fruto del entusiasta trabajo de personas con ganas de aportar algo a elementos de nuestra sociedad útiles para todos. Por ese motivo, aprovecho estas primeras páginas para agradecer a quienes directa e indirectamente han participado en este estudio.

A mi tutor, César Briso, quien siempre me ha acompañado pacientemente a pesar de los cambios de ritmo en la elaboración de este estudio. Admiro su positividad y su cercanía. En esta línea, agradezco el apoyo de la Comisión de Doctorado de la Escuela por su acompañamiento durante estos años.

A mi mentor y amigo Rafael Gutiérrez, con quien gracias a los proyectos que llevamos a cabo en Ineco, pudimos indagar en cosas que nos resultaban necesarias para mejorar la industria en la que trabajábamos. Ambos teníamos la ilusión de contribuir con nuestro esfuerzo. También, a la colaboración de mis compañeros de Ineco, quienes siempre han estado encantados de aportar sus ideas y pensamientos a esta investigación.

A mi familia, porque siempre está a mi lado, dispuesta a acompañarme en lo necesario, animándome con estos proyectos tan bonitos para darles sentido. En particular, a mis padres por enseñarme desde pequeña a ser libre.

A mis amigos, que por suerte son muchos. A los de la universidad, quienes alguna vez me han acompañado a trabajar en esta tesis e incluso se han interesado por el contenido. A mis amigos de Tomelloso, que siempre han sabido recordarme la importancia de equilibrar el trabajo con los momentos de diversión. A mis amigos de Madrid y meditación, que siempre saben cómo orientarme y animarme a no caer en la procrastinación.

A los compañeros que han participado en el progreso de la tesis en Thales, en Adif, en Siemens y actualmente en EIT Digital.

A todos porque, cuando había perdido el sentido, me ayudaron a recordar que lo hago quizás sirva para mejorar algo tan importante de nuestra sociedad como es el ferrocarril.



# Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el Grupo de Radiocomunicaciones (GRC) de la Universidad Politécnica de Madrid, grupo de investigación consolidado ubicado en la Escuela Técnica de Sistemas de Comunicaciones (ETSIST), en el marco de ENABLING 5G TEC2014-55735-C3-2-R financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España, y financiado también por el Proyecto de Cooperación Estratégica Internacional China del Plan Nacional Clave de I+D, 2016YFE0200200, en el que colaboran activamente las empresas líderes del sector.

Asimismo, se ha recibido el apoyo de la Comisión Europea a través del proyecto Roll2Rail, uno de los proyectos faro de Shift2Rail dentro del programa Horizonte 2020. El proyecto Roll2Rail ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención número 636032. Asimismo, los autores desean expresar su agradecimiento a COWITRACC (TEC2014-59490-C2-1-P/2-P) del Gobierno de España.

Por último, agradecer a Ineco los esfuerzos realizados dentro del proyecto de estudio de viabilidad de GPS para Asturias y el proyecto interno dedicado a la investigación sobre el uso de la sustitución de la fibra óptica por MNOs. También a Thales por la colaboración en el proyecto gracias a sus equipos de señalización ferroviaria desde el laboratorio de Thales, y a Adif por permitir estas mediciones a lo largo de la línea ferroviaria Guardo-Balmaseda. Este estudio está alineado con el plan de eliminación del Bloque Telefónico en aproximadamente 3000 km a lo largo de las líneas ferroviarias españolas.



# Abstract

This doctoral thesis presents wireless communication alternatives for the railway industry. It focuses on signal propagation and the development of advanced technologies to improve the current railway systems. Different technologies are analysed to optimise railway communication, focusing on signalling and operational efficiency, with validations in real environments. The study includes new implementations to connect railway elements, extending traditional train-to-ground communication towards machine-to-train, train-to-train communication and GNSS applications. However, these developments face challenges of implementation, standardisation and spectrum regulation.

The thesis addresses the transition to more modern technologies such as FRMCS and the implementation of 5G, due to the obsolescence of the GSM-R system. This transition is part of an effort to modernise rail transport in the transition between GSM-R and FRMCS. In addition to the expansion of the railway infrastructure and the commitment to more sustainable and efficient transport.

The thesis is organised into chapters dealing with different communication proposals, starting from the state of the art describing the evolution of railway communication technologies.

In this context, firstly, a channel model for millimetre-band propagation in railway tunnels is presented. This analysis validates the feasibility of using 24 GHz signals through propagation modelling, measurements, ray-tracing simulations and a modal propagation model compared to a more accurate path loss model.

Then, the second proposal focuses on the characteristics of the links inside the train itself in Metro de Madrid's metropolitan railways, characterising communication links inside the train, inside-outside and outside-outside links. For this purpose, the campaign of channel measurements carried out in the 2.6 GHz band for this type of link is shown. The results are useful for the design of these systems since they show empirical attenuation values in the different sub-environments typical of railways, such as tunnels, outdoor space and stations. In this same band, as a third proposal, train-to-train communications are evaluated, analysing the interference between trains and its impact on the narrowband signal when trains cross each other. The results show path loss models according to the environment and a broadband analysis with delay spread.

The fourth proposal establishes signalling communications in 4G and 5G networks based on MNOs for railway signalling. The results show that MNOs can provide the required quality of service in terms of physical and network layers and is therefore a candidate to be considered for the development of FRMCS.

Finally, the availability of GPS coverage along railway lines in difficult-to-access mountainous areas is analysed. The results show how GNSS signal reception varies according to the configurations used and that implementing systems is feasible, taking into account a series of indications to deal with the limitations of such a system.

In summary, this thesis explores multiple proposals to improve wireless communications in

the railway domain, addressing both critical signalling and train communication applications and other operational applications. With these innovations, the rail industry can adopt new ways forward in a more advanced and resilient telecommunications infrastructure, capable of supporting modern, connected mobility that responds to the growing demands for transport efficiency.

# Resumen

Esta tesis doctoral presenta propuestas de comunicaciones inalámbricas para la industria del ferrocarril, con énfasis en la propagación de señales y el desarrollo de tecnologías avanzadas para mejorar los actuales sistemas ferroviarios. Se analizan diferentes tecnologías para optimizar la comunicación ferroviaria, enfocándose en la señalización y la eficiencia operativa, con validaciones en entornos reales. El estudio incluye nuevas implementaciones para conectar los elementos ferroviarios, ampliando la comunicación tradicional de comunicaciones tren-tierra hacia comunicaciones de máquina, tren a tren y aplicaciones de geolocalización. Sin embargo, estos avances enfrentan desafíos de implantación, estandarización y regulación del espectro.

La tesis aborda la transición hacia tecnologías más modernas como el FRMCS y la implementación del 5G, debido a la obsolescencia del sistema GSM-R. Esta transición se enmarca en un esfuerzo para modernizar el transporte ferroviario en la transición entre el GSM-R y FRMCS. Además de la expansión de la infraestructura ferroviaria y la apuesta por un transporte más sostenible y eficiente.

La tesis se organiza en capítulos que abordan diferentes propuestas de comunicación, partiendo del estado del arte que describe la evolución de las tecnologías de comunicación ferroviaria.

En este contexto, en primer lugar, se presenta un modelo de canal para la propagación en bandas milimétricas dentro de túneles ferroviarios. Este análisis valida la viabilidad del uso de señales en 24 GHz a través de modelos de propagación, a través de mediciones, simulaciones de trazado de rayos y un modelo de propagación modal comparado con un modelo de pérdida de trayecto más preciso.

A continuación, la segunda propuesta se enfoca en las características de los enlaces dentro del propio tren en ferrocarriles metropolitanos de Metro de Madrid caracterizando enlaces de comunicación en el interior del tren, enlaces interior-exterior y exterior-exterior. Para ello, se muestra la campaña de medidas de canal realizadas en la banda de 2,6 GHz para este tipo de enlaces. Los resultados son útiles para hacer diseño de estos sistemas, dado que muestran valores de atenuación empíricos en los distintos subentornos propios de los ferrocarriles, tales como túneles, espacio exterior y estaciones. En esta misma banda, como tercera propuesta, se evalúan las comunicaciones tren a tren, analizando la interferencia entre trenes y su impacto en la señal de banda estrecha cuando se hacen cruce de trenes. Los resultados muestran modelos de pérdidas del camino según el entorno y un análisis de banda ancha con la dispersión de retardo.

La cuarta propuesta comprende el establecimiento de comunicaciones de señalización en redes 4G y 5G basadas en MNOs para la señalización ferroviaria. Los resultados demuestran que los MNO pueden proporcionar la calidad de servicio requerida en términos de las capas física y de red y que, por tanto, es un candidato a tener en cuenta de cara al desarrollo del FRMCS.

Por último, se analiza la disponibilidad de cobertura GPS a lo largo de las líneas ferroviarias en zonas montañosas de difícil acceso. Los resultados muestran cómo la recepción de señal GNSS varía según las configuraciones utilizadas y que la implementación de sistemas es viable, teniendo en cuenta una serie de indicaciones para lidiar con las limitaciones de un sistema de

estas características.

En resumen, esta tesis explora múltiples propuestas para mejorar las comunicaciones inalámbricas en el ámbito ferroviario, abordando tanto la señalización crítica como las aplicaciones de comunicación para trenes y como otras aplicaciones operativas. Con estas innovaciones, la industria ferroviaria puede adoptar nuevas vías en una infraestructura de telecomunicaciones más avanzada y resiliente, capaz de soportar una movilidad moderna y conectada que responde a las crecientes demandas de eficiencia en el transporte.

# Tabla de Contenido

Agradecimientos . . . . .	v
Abstract . . . . .	vii
Resumen . . . . .	ix
Lista de Figuras . . . . .	xiv
Lista de Tablas . . . . .	xvii
Abreviaturas y acrónimos . . . . .	xxi
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del arte . . . . .	1
1.1.1 Contexto global. Desarrollo de la industria ferroviaria en Europa y el mundo . . . . .	2
1.1.2 Contexto tecnológico. Tipos de enlaces de comunicaciones en la actualidad	6
Radio Móvil Terrestre (TETRA, GSM-R, Tren-Tierra y otras redes propietarias UHF/VHF) . . . . .	6
Wi-Fi, LTE y LTE-R para aplicaciones ferroviarias . . . . .	7
Comunicaciones por satélite y radioenlaces . . . . .	7
1.1.3 Necesidades y requerimientos de comunicaciones para el ferrocarril . .	8
Servicios críticos ferroviarios . . . . .	10
Servicios no-críticos ferroviarios . . . . .	11
Tecnologías de comunicaciones inalámbricas . . . . .	11
1.1.4 FRMCS . . . . .	12
Múltiples tecnologías de acceso radio y <i>Decoupling</i> de servicios y transporte	13
Equipos embarcados FRMCS . . . . .	14
Cronología y versiones del FRMCS . . . . .	15
1.1.5 Evolución de <i>Releases</i> de 3GPP para FRMCS . . . . .	16
Servicios de misión crítica . . . . .	17
Adaptaciones de radio superar los 350 km/h y la definición de la Nueva Radio (NR) . . . . .	19
Modalidades de implementación de la red . . . . .	21
1.1.6 Espectro radioeléctrico . . . . .	22
Uso del espectro en el ferrocarril actualmente y plan para FRMCS . .	22
Ondas milimétricas . . . . .	23
1.1.7 Enlaces de comunicaciones para el ferrocarril . . . . .	24
Comunicaciones tren-tierra . . . . .	25

	Comunicaciones a bordo del tren . . . . .	27
	Comunicaciones tren-tren . . . . .	28
	Comunicaciones entre máquinas . . . . .	28
	Comunicaciones de geoposicionamiento . . . . .	29
1.2	Objetivos . . . . .	29
1.2.1	Objetivo 1. Comunicaciones Tren-Tierra con a través de ondas milimétricas	30
1.2.2	Objetivo 2. Comunicaciones a bordo del tren y tren-tren . . . . .	30
1.2.3	Objetivo 3. Comunicaciones entre trenes . . . . .	31
1.2.4	Objetivo 4. Comunicaciones entre máquinas . . . . .	31
1.2.5	Objetivo 5. Comunicaciones de geoposicionamiento . . . . .	32
1.3	Metodología . . . . .	32
1.3.1	Procedimiento metodológico . . . . .	32
1.3.2	Justificación de la metodología . . . . .	33
1.4	Estructura del documento . . . . .	33
<b>2</b>	<b>Modelos de propagación y fundamentos de la comunicaciones inalámbricas</b>	<b>35</b>
2.1	Modelos de propagación de banda estrecha . . . . .	35
2.1.1	Modelo de pérdidas del camino . . . . .	35
2.1.2	Modelo de pérdidas del camino en espacio libre . . . . .	37
2.1.3	Pérdidas del camino en <i>shadowing</i> . . . . .	38
2.1.4	Balance de enlace . . . . .	38
2.2	Modelos estocásticos de pequeña escala . . . . .	39
2.2.1	Distribución de Rayleigh . . . . .	39
2.2.2	Distribución de Rician . . . . .	39
2.2.3	Otras distribuciones estadísticas . . . . .	40
	Distribución de Nakagami . . . . .	40
	Distribución de Weibull . . . . .	40
2.3	Propagación de ondas en túneles . . . . .	40
2.4	Técnica de trazado de rayos en 3D . . . . .	42
2.5	Conceptos relevantes de la aplicación de los sistemas GNSS al transporte ferroviario . . . . .	44
2.5.1	Número de satélites . . . . .	44
2.5.2	Efectos de la propagación . . . . .	45
	Estructura del tren . . . . .	45
	Orografía, perfil de elevación y vegetación . . . . .	45
	Túneles . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Modelado y caracterización de la propagación en túneles a frecuencias milimétricas</b>	<b>47</b>
3.1	Mediciones en onda milimétrica para la modelización de un túnel de ferrocarril metropolitano . . . . .	47
3.1.1	Herramienta de simulación y configuración de medidas . . . . .	47
3.1.2	Configuración del escenario de medidas . . . . .	49
3.2	Resultados de las medidas . . . . .	51
3.2.1	Modelo de pérdidas de camino y desvanecimientos lentos . . . . .	51

3.2.2	Desvanecimiento rápidos . . . . .	55
3.3	Conclusiones de comunicaciones en banda de ondas milimétricas . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Comunicaciones inalámbricas en los subsistemas del tren</b>	<b>57</b>
4.1	Pruebas realizadas y metodología . . . . .	57
4.1.1	Tipos de pruebas . . . . .	58
4.2	Escenarios del estudio de la propagación en interior de trenes . . . . .	59
4.2.1	Medidas en a lo largo del interior de tren . . . . .	59
4.2.2	Medidas para comunicaciones con enlace exterior-exterior e interior-exterior al tren . . . . .	60
4.3	Modelado de pérdidas del camino de en el interior de un tren . . . . .	62
4.4	Medidas para enlace exterior-exterior al tren e interior-exterior . . . . .	66
4.5	Conclusiones de las comunicaciones inalámbrica en los subsistemas del tren . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Comunicaciones Tren a Tren</b>	<b>71</b>
5.1	Escenario de pruebas . . . . .	71
5.2	Resultados de pruebas . . . . .	72
5.2.1	Modelo de interferencias en banda estrecha y desvanecimientos lentos	72
5.2.2	Desvanecimientos rápidos . . . . .	74
5.3	Conclusiones sobre las comunicaciones Tren a Tren . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Aplicación de las comunicaciones 5G basadas en MNOs para servicios críticos de señalización ferroviaria</b>	<b>77</b>
6.1	Metodología y diseño de la red . . . . .	78
6.1.1	Requerimientos de los sistemas de señalización para los sistemas de telecomunicaciones . . . . .	78
6.1.2	Perspectiva de la pila de protocolos . . . . .	79
6.2	Arquitectura y configuración del prototipo . . . . .	80
6.2.1	Arquitectura del prototipo . . . . .	80
6.2.2	Arquitectura de <i>software</i> . . . . .	81
6.3	Escenarios de medida . . . . .	82
6.3.1	Laboratorio de señalización ferroviaria . . . . .	82
6.3.2	Laboratorio de comunicaciones . . . . .	82
6.3.3	Pruebas en campo en un entorno ferroviario . . . . .	83
6.4	Resultados de medidas en los distintos escenarios . . . . .	83
6.4.1	Caracterización de los parámetros de calidad de servicio para señalización	83
6.4.1.1	Caracterización de tráfico de datos de un sistema de señalización . . .	83
6.4.1.2	Latencia and <i>Jitter</i> . . . . .	84
6.4.2	Pruebas de telecomunicaciones . . . . .	85
6.4.2.1	Caracterización de las redes 4G y 5G de los MNOs . . . . .	86
6.4.2.2	Comparación entre una solución de usuario habitual y con SLA . . .	88
6.4.3	Medidas en campo en un entorno ferroviario . . . . .	88
6.5	Conclusiones de las comunicaciones basadas en MNOs para servicios críticos de señalización ferroviaria . . . . .	90

<b>7</b>	<b>Geoposicionamiento por satélites GNSS para aplicaciones ferroviarias</b>	<b>93</b>
7.1	Información de partida . . . . .	93
7.1.1	Información sobre las líneas ferroviarias de FEVE en Asturias . . . . .	93
7.2	Equipamiento, Procesamiento De Datos y Configuración de los Escenarios de Medida . . . . .	94
7.3	Análisis detallado de una de las líneas . . . . .	97
7.3.1	Situación de la línea . . . . .	98
7.3.2	Tipo de Tren 1 . . . . .	99
	Estadísticas generales de las medidas . . . . .	99
	Número de satélites . . . . .	99
	Horizontal dilution of precision . . . . .	99
	Representación gráfica de cobertura GPS en fronteras tarifarias . . . . .	100
7.3.3	Serie 2900 . . . . .	100
	Estadísticas generales de las medidas . . . . .	100
	Número de satélites . . . . .	101
	Horizontal dilution of precision . . . . .	102
	Representación gráfica de cobertura GPS en fronteras tarifarias . . . . .	102
7.3.4	Resumen de la línea . . . . .	103
7.4	Análisis general considerando todas las líneas y series de trenes . . . . .	104
7.4.1	Análisis en las estaciones frontera . . . . .	105
7.4.2	Consideraciones y limitaciones de las siguientes implementaciones . . . . .	106
	Terminal Qualipoc . . . . .	106
	Equipo Septentrio . . . . .	108
7.5	Conclusiones del geoposicionamiento por satélites GNSS . . . . .	109
<b>8</b>	<b>Conclusiones finales y líneas futuras</b>	<b>111</b>
8.1	Conclusiones finales . . . . .	111
8.1.1	Comunicaciones tren-tierra en bandas milimétricas para trenes metropolitanos . . . . .	111
8.1.2	Comunicaciones en el interior de tren para comunicaciones a lo largo del tren, y su conexión interior-exterior del tren . . . . .	112
8.1.3	Comunicaciones Tren a Tren . . . . .	112
8.1.4	Comunicaciones entre máquina a través de MNOs . . . . .	113
8.1.5	Uso de sistemas de geoposicionamiento para sistemas no críticos . . . . .	114
8.2	Líneas futuras . . . . .	115
	<b>Bibliografía</b>	<b>117</b>
	<b>Anexo 1. Resultados numéricos de los experimentos realizados en el Capítulo 4</b>	<b>127</b>
	<b>Anexo 2. Publicaciones científicas realizadas durante la investigación</b>	<b>129</b>

# Lista de Figuras

1.1	Tecnologías inalámbricas utilizadas en la actualidad en el ferrocarril en España	6
1.2	Sistemas de Señalización y Control en la Infraestructura Ferroviaria	8
1.3	Tipos de servicios para la industria del ferrocarril	9
1.4	Mejoras introducidas por el FRMCS en relación con el GSM-R	12
1.5	Arquitectura del FRMCS según la actual definición del sistema [48]	13
1.6	Línea temporal del progreso de las comunicaciones móviles en el ferrocarril	16
1.7	Resumen de aplicaciones por <i>Releases</i> y años de desarrollo de las mismas	17
1.8	Utilización por los trenes de alta velocidad de los eNB LTE estándar (red de frecuencia no única) vs Utilización de una red de frecuencia única (SFN) específica [76]	19
1.9	Representación gráfica de los enlaces objeto de estudio de esta tesis	25
2.1	Representación gráfica del comportamiento de las señales en su análisis de banda estrecha [137]	37
2.2	El método de la imagen. $R_i$ con respecto al plano de tierra	43
3.1	Interfaz de usuario del simulador con parámetros de configuración	48
3.2	Escenario de simulación con Tx fijo (en negro) y Rx móvil (en azul)	49
3.3	Escenarios desde el punto de vista de la simulación y del escenario real de medición	50
3.4	Comparación entre mediciones, simulación y modelo modal para polarización vertical y horizontal	52
3.5	RT Resultados de la simulación para un número diferente de reflexiones de cada rayo	54
3.6	Comparación entre mediciones y simulación de la función de densidad de probabilidad de desvanecimiento rápido	55
4.1	Trenes continuos (izquierda) y no continuos (derecha)	60
4.2	Escenario de medida para las pérdidas del camino dentro del tren.	60
4.3	Disposición de las antenas en las medidas intra-tren	61
4.4	Resultados de banda estrecha para las comunicaciones intra-tren	63
4.5	Medidas con antenas interiores.	64
4.6	Impacto del movimiento de personas para el tren continuo.	64
4.7	Función de densidad de probabilidad (tren continuo) con movimiento de personas de las pérdidas del camino	65

4.8	Esquema de medición en medidas intra-tren. . . . .	66
4.9	Medidas en banda estrecha en diferentes ubicaciones: (a) Estación, (b) Túnel, (c) Área exterior. . . . .	67
4.10	Funciones densidad de probabilidad para banda estrecha de las antenas exteriores (izquierda) e interiores (derecha). . . . .	68
4.11	Comparación entre los perfiles de retardo en los diferentes sub-escenarios. . .	68
4.12	Modelo de perfil de retardo de potencia. . . . .	69
5.1	Esquema de medida T2T . . . . .	71
5.2	Comparación entre todos los sub-escenarios para antenas exteriores y la inferior, para interiores . . . . .	73
5.3	Representación de las pérdidas del camino de los tren sub-escenarios. . . . .	74
5.4	Comparación entre pérdidas del camino en comunicaciones tren a tren . . . . .	74
5.5	Funciones densidad de probabilidad para tren a tren de las antenas . . . . .	75
6.1	Enfoque de diseño y prueba de pila de protocolos. . . . .	79
6.2	Prototipo y configuración de la arquitectura de medición. . . . .	81
6.3	Arquitectura de módulos distribuidos por software. . . . .	82
6.4	Velocidad de bits de señalización para un conjunto de tareas. . . . .	84
6.5	Señalización y tiempo de ida y vuelta (RTT, de sus siglas en inglés <i>Roundtrip Time</i> ) de la red. . . . .	86
6.6	Función de densidad acumulada de los KPI de la red. . . . .	86
6.7	RSRP, RSRQ y SINR medidas de CDF para 4G (derecha) y 5G (izquierda). . . . .	87
6.8	Rendimiento de la red MNO (latencia y jitter) según SLA y un usuario normal . . . . .	88
6.9	Entorno de medidas en el tramo Guardo–Mataporquera de la Línea Guardo–Balmaseda . . . . .	89
6.10	Mediciones de campo en el tramo Guardo–Mataporquera de la Línea Ferroviaria Guardo–Balmaseda. . . . .	90
7.1	Tipos de Series en Líneas FEVE . . . . .	94
7.2	Esquema de situación . . . . .	94
7.3	Conexión de equipos de medida . . . . .	95
7.4	Dispositivo receptor Septentrio . . . . .	96
7.5	Instalación de antena exterior para realización medidas GPS . . . . .	97
7.6	Instalación de antena interior para realización de medidas GPS . . . . .	97
7.7	Mapa de situación de la línea C8f . . . . .	98
7.8	Perfil de elevación del terreno en la línea C8f . . . . .	98
7.9	Resumen estadístico de las medidas para la serie 3600 de la línea C8f . . . . .	99
7.10	Número de satélites a lo largo de las estaciones frontera de zona tarifaria para la serie 3600 de la línea C8f . . . . .	100
7.11	Parámetro de Dilution of Precision en el plano horizontal para la serie 3600 de la línea C8f . . . . .	100
7.12	Puntos fronterizos entre zonas tarifarias línea C8f (serie 3600) . . . . .	101
7.13	Resumen estadístico de las medidas para la serie 3600 de la línea C8f . . . . .	101
7.14	Número de satélites a lo largo de las estaciones frontera de zona tarifaria para la serie 2900 de la línea C8f . . . . .	102

7.15	Parámetro de Dilution of Precision en el plano horizontal para la serie 2900 de la línea C8f . . . . .	102
7.16	Puntos fronterizos entre zonas tarifarias línea C8f (serie 2900) . . . . .	103
7.17	Fotografías de las series de tren para ubicación de antenas en el exterior . . .	108
1	Póster Rail Live . . . . .	157



# Lista de Tablas

1.1	Los dos rangos de frecuencias NR: FR1 y FR2 . . . . .	20
1.3	Bandas de frecuencia NR 5G n100 y GSM-R . . . . .	23
1.5	Comunicaciones tren-tierra . . . . .	26
3.1	Mediciones en túnel en ondas milimétricas. Parámetros de configuración . . .	51
3.3	Mediciones en túnel en mmW. Comparación entre el exponente de pérdida de trayectoria . . . . .	53
3.5	Mediciones en túnel en mmW. Parámetros principales del desvanecimiento rápido	56
4.1	Parámetros de transmisión en banda estrecha . . . . .	59
5.1	Comparación del modelo de pérdidas del camino en comunicaciones tren a tren	73
5.3	Parámetros de pérdidas del camino de acuerdo a Ecuación 5.1 . . . . .	73
5.4	Comparación de parámetros de modelado de desvanecimientos rápidos entre sub-escenario y topología de antenas en tren a tren . . . . .	75
6.1	Requisitos de comunicación para equipos de señalización ferroviaria. . . . .	79
6.2	KPIs de la red. Valores promedio obtenidos en la capa de aplicación, centrándose en la señalización de servicios críticos. . . . .	85
6.3	KPI de radio. Valores umbral de radio 4G/5G para garantizar disponibilidad el 99 % del tiempo para una latencia inferior a 500 ms. . . . .	88
7.1	Resumen de las características de las mediciones . . . . .	96
7.3	Resumen combinado de parámetros y estaciones frontera . . . . .	103
7.5	Resumen del porcentaje de tiempo con medidas y HDOP . . . . .	104
7.6	Resumen del número de satélites por línea y serie . . . . .	104
7.7	Cobertura de medidas satelitales por estación y serie de trenes . . . . .	106
7.9	Porcentaje de muestras válidas para un periodo de muestreo de 1, 1,5, 2, 3, 4, 60 y 8 minutos 20 segundos en equipo terminal móvil (Qualipoc) . . . . .	107
7.11	Parámetros resumen de las series de tren . . . . .	108
1	Parámetros importantes en medidas de banda estrecha . . . . .	127
3	Parámetros estadísticos comparados entre sub-escenario y topología de antenas en banda estrecha . . . . .	127
5	Datos principales de banda ancha según sub-escenario . . . . .	128
7	Atenuación relativa a la componentes LoS del PDP . . . . .	128



## Abreviaturas y acrónimos

- 2D** 2 Dimensiones
- 3D** 3 Dimensiones
- 3GPP** *3rd Generation Partnership Project*
- 4G** Cuarta Generación
- 5G** Quinta Generación
- 5GRail** Proyecto Europeo
- A-GPS** GPS asistido
- AoA** *Angle of Arrival*
- ATC** Sistema de Control Automático de Trenes
- ATP** Sistema Automático de Protección
- BBU** *Base Band Unit*
- CA** Agregación de portadoras
- CBTC** Control de Trenes Basado en Comunicaciones
- CCTV** Circuito cerrado de televisión
- CEF** *Connecting Europe Facility*
- dB** Decibelios
- dBm** Unidad de medida de relación o razón de potencia expresada en decibelios relativa a un mili vatio (mW)
- DISSSI** Doctorado en Ingeniería de Sistemas y Servicios para la Sociedad de la Información
- eMBMS** Servicio *multicast* de difusión multimedia evolucionado
- E-UTRA** Red de acceso radio de LTE
- EFE** Empresa de los Ferrocarriles del Estado en Chile
- EFTA** Asociación Europea de Libre Comercio
- ERJU** *Europe's Rail Joint Undertaking*
- ERTMS** Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario

**ETCS** Sistema Europeo de Control de Trenes

**ETSI** Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones

**ETSIST** Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación

**EPC** *Evolved Packet Core*

**FDD** Duplexación por división de frecuencia

**FEVE** Ferrocarriles de vía estrecha

**FR1,2** Frecuencias

**FRMCS** *Future Railway Mobile Communication System*

**FSPL** Modelo de pérdidas del camino del espacio libre

**GLONASS** Sistema global de navegación por satélite

**GNSS** Sistema global de navegación por satélite

**GPS** *Global Positioning System*

**GRC** Grupo de Radiocomunicaciones

**GSM-R** *Global System for Mobile Communications – Railway*

**GTW** *Gateway*

**HDOP** *Horizontal dilution of precision*

**HST** Trenes de alta velocidad

**HTTP** Protocolo de transferencia de hipertexto

**Hz** Hercios

**IACS** sistemas de automatización industrial y control

**ID** Identificador

**intra-RAT** Traspaso se produce dentro de la misma tecnología de acceso radioeléctrico

**IoT** Internet de las Cosas

**IP** Protocolo de Internet

**ITS** Sistemas Inteligentes de Transporte

**IXL** Enclavamiento

**km/h** kilómetros por hora

**KPI** Indicadores clave de rendimiento

**LEO** Satélites de órbita baja

**LoS** Línea de visión directa

**LTE** *Long Term Evolution*

**LTE-R** *Long Term Evolution for Railway*

**Matlab** Sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio

**MC** *Mission Critical*

**MCData** Datos de misión crítica

**MCPTT** *Push-To-Talk* de Misión Crítica

**MCVideo** Vídeo de misión crítica

**MCX** Servicios de misión crítica

**MIMO** División de la señal de transmisión en múltiples flujos de datos, que se transmiten a través de múltiples antenas

**mmW** Ondas milimétricas

**MNO** Operadores públicos de telefonía móvil

**MORANE** *Mobile Radio for Railway Networks in Europe*

**MRN** *Mobile Relay Network*

**ms** mili segundos

**MTC** Comunicaciones de tipo máquina

**NLoS** No-Línea de visión directa

**NSA** *Non-Standalone*

**O2I** *Outdoor to indoor*

**OB** *On-board*

**ObjC** Controlador de Objetos

**OFDM** Multiplexación por división de frecuencias ortogonales

**PC** Computadora personal

**PDF** Función de densidad de potencia

**PDOP** *Position dilution of precision*

**PDP** Perfil de retardo de potencia

**PIRE** Potencia isotrópica radiada equivalente

**ProSe** Servicios de proximidad

**PVT** Posición, velocidad y tiempo

**QAM** Modulación de amplitud en cuadratura

**QoS** Calidad del servicio

**QPSK** Modulación por desplazamiento de fase

**RAM** Fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad

**RAN** Red de acceso radio

**RMR** *Railway Mobile Radio*

**RRH** Cabeza radio remota

**RRM** Gestión de recursos de radio

**RSRP** Potencia recibida de la señal de referencia

**RSRQ** Indicador de calidad de señal para redes

**RT** *Ray tracing*

**RTT** *Roundtrip time*

**Rx** Receptor

**SA** Red 5G independiente

**SATCOM** Sistemas de comunicación satelitales

**SBAS** Sistema de Aumentación Basado en Satélites

**SFN** Red de frecuencia única

**SINR** Relación señal ruido-interferencia

**SIP** *Session Initiation Protocol*

**SLA** *Service Level Agreement*

**SNR** Relación señal a ruido

**T2T** Tren a Tren

**TCMS** Sistema de Control y Gestión de Trenes

**TDD** Duplexación por división de tiempo

**TDOP** *Time dilution of precisión*

**TEN-T** Red Transeuropea de Transporte

**TETRA** *Terrestrial Trunked Radio*

**TS** *Trackside*

**TTFE** *Time To First Fix*

**Tx** Transmisión

**UDP** *User Datagram Protocol*

**UE** Equipo de usuario

**UIC** *International Union of Railways*

**UPM** Universidad Politécnica de Madrid

**USRP** Radio definida por Software

**VDOP** *Vertical dilution of precision*

**Wi-Fi** *Wireless Fidelity*



# Capítulo 1

## Introducción

Esta tesis doctoral propone una serie de alternativas tecnológicas de comunicaciones inalámbricas para la industria del ferrocarril. Se centra en varios aspectos de las telecomunicaciones, especialmente en la propagación de señales y en el desarrollo de tecnologías avanzadas para mejorar los sistemas de comunicación actuales utilizados en los entornos ferroviarios. En este sentido, la tesis describe varias propuestas de implementación de redes de telecomunicaciones según el servicio y el enlace de comunicación implicado. Se explora cómo diferentes tecnologías pueden optimizar la comunicación en este entorno, mejorando la señalización y la eficiencia operativa en un contexto de evolución de los sistemas de telecomunicaciones actuales. El estudio incluye la validación de estos sistemas en entornos ferroviarios reales y demuestra cómo las tecnologías de telecomunicación pueden mejorar sustancialmente los servicios ferroviarios en su conjunto.

### 1.1 Estado del arte

El estudio de esta tesis se halla en un contexto en el que los sistemas de comunicaciones ferroviarias se preparan para un importante cambio de paradigma con la normalización del futuro sistema de comunicaciones móviles por radio (FRMCS, de sus siglas en inglés *Future Radio Mobile Communication System*) y la introducción del 5G en el sector ferroviario [1, 2].

El GSM-R (*Global System for Mobile Communications – Railway*) [3] es un sistema de comunicaciones especializado que ha sido ampliamente utilizado en las redes ferroviarias de Europa y otros países desde finales de los años 90. Los hitos más importantes de esta tecnología son los siguientes [4]:

- 2000: Se formalizó el estándar GSM-R, que se basó en la tecnología GSM, adaptado para las necesidades del transporte ferroviario.
- 2002: Se comenzó la implementación de GSM-R en varios países europeos, siendo Italia uno de los primeros en adoptarlo.
- 2006: La Agencia Europea de Seguridad Ferroviaria (ERA) comenzó a promover el uso de GSM-R en toda Europa como parte del sistema de gestión del tráfico ferroviario.

- 2010 en adelante: Se expandió su uso a nivel mundial, con varios países fuera de Europa también adoptando esta tecnología para mejorar la comunicación en sus redes ferroviarias.

Basado en la tecnología GSM de segunda generación, GSM-R ha permitido la comunicación segura y eficiente entre los trenes y los centros de control, contribuyendo de manera significativa a la modernización de la señalización y al aumento de la seguridad en las operaciones ferroviarias.

A pesar de su éxito, el avance de las tecnologías de telecomunicaciones y las nuevas demandas del sector ferroviario han hecho necesario planificar su reemplazo y desmantelamiento, con el objetivo de adaptar los sistemas de comunicación a las necesidades futuras dado que el GSM-R se vuelve obsoleto [5] y los proveedores de telecomunicaciones están abandonando el mantenimiento de redes GSM tradicionales. Esto significa que mantener GSM-R en funcionamiento se volverá cada vez más costoso y complejo [6]. Estos motivos añaden urgencia al plan de desmantelamiento y transición hacia soluciones más modernas. Como consecuencia, las autoridades ferroviarias europeas y de otros países que utilizan esta tecnología han trazado un plan de reemplazo, cuya finalización está prevista para alrededor de 2030-2035 [7].

Se ha previsto una implementación progresiva de su sucesor, el FRMCS, comenzando por los corredores y líneas ferroviarias más importantes [6]. Durante este periodo de transición, una de las estrategias plantea la coexistencia tanto de GSM-R como del nuevo sistema FRMCS para asegurar que no haya interrupciones en las comunicaciones críticas entre los trenes y los centros de control.

No obstante, el desmantelamiento de GSM-R también supone un desafío costo y técnicamente complejo [8]. La sustitución de la infraestructura existente, que incluye estaciones base, equipos a bordo de los trenes y sistemas de señalización, requiere de inversiones significativas y una cuidadosa planificación. A su vez, los operadores ferroviarios deben coordinarse internacionalmente, ya que GSM-R es utilizado en varias redes ferroviarias europeas, y la transición debe ser coherente para evitar problemas de compatibilidad en los servicios transfronterizos [9].

### **1.1.1 Contexto global. Desarrollo de la industria ferroviaria en Europa y el mundo**

Los sistemas de transporte ferroviario se están desarrollando a gran velocidad en todo el mundo, especialmente en Europa y China. El ferrocarril es el sistema de transporte con mayor capacidad, después del transporte por barco, por lo que su desarrollo es muy importante para los países con alta densidad de población.

La Comisión Europea ha establecido una serie de políticas y objetivos para impulsar el transporte ferroviario en Europa como parte de su estrategia de movilidad sostenible y del Pacto Verde Europeo. Estos objetivos y políticas están diseñados para promover un sistema de transporte ferroviario más eficiente, sostenible y competitivo en Europa. Algunas de las iniciativas clave incluyen [10]:

- Revisión del Reglamento sobre los derechos de los pasajeros del ferrocarril: la Comisión

Europea había propuesto revisar las normativas que rigen los derechos de los pasajeros del ferrocarril para fortalecer y garantizar un alto nivel de calidad y servicio en todo el sistema ferroviario europeo.

- Fomento de la interoperabilidad [11] [12]: se busca garantizar la interoperabilidad de los sistemas ferroviarios en toda la Unión Europea, lo que significa que los trenes y las infraestructuras ferroviarias deben poder funcionar de manera armoniosa en diferentes países europeos sin obstáculos técnicos o burocráticos para los trenes que cruzan fronteras. El proyecto [13] examina las soluciones prototipo para la interoperabilidad entre GSM-R y FRMCS, describiendo los componentes técnicos que facilitarán la migración en las redes ferroviarias europeas.
- Desarrollo de la Red Transeuropea de Transporte (TEN-T) [9]: la Comisión Europea continúa trabajando en el desarrollo de la red TEN-T, que incluye corredores ferroviarios prioritarios que conectan diferentes regiones de Europa y promueven el transporte ferroviario como una opción viable y sostenible para el transporte de mercancías y pasajeros.

La Red Transeuropea de Transporte (TEN-T) ha tenido varios hitos importantes en su desarrollo. En 1990, se establecieron las Redes Transeuropeas (TEN) como marco estratégico para integrar infraestructuras esenciales en Europa [14]. Posteriormente, en 1996, el Parlamento Europeo formalizó la red TEN-T con el objetivo de garantizar un transporte eficiente y rápido [15]. En 2006, se creó la Agencia Ejecutiva TEN-T para gestionar técnica y financieramente los proyectos de la red [16]. Durante el período 2014-2020, se dio prioridad al desarrollo de la Red Básica (*Core Network*), abordando proyectos clave para eliminar cuellos de botella, mejorar conexiones transfronterizas y fomentar la multimodalidad, con una planificación que se extiende hasta 2031 [17].

- Promoción de la movilidad sostenible [10]: se fomenta la adopción de medios de transporte sostenibles, como el ferrocarril, como alternativa a los modos de transporte más contaminantes, como los vehículos privados y camiones. En 2020, la Comisión Europea impulsó diversas iniciativas para fomentar el uso del ferrocarril como una alternativa más ecológica y eficiente frente a los medios de transporte más contaminantes, como los vehículos privados y los camiones [18]. En 2021, [10] destacó la importancia de la movilidad sostenible como un factor clave para reducir la huella de carbono del sector del transporte [10]. Más recientemente, en 2022, [19] abordó los retos y las oportunidades que presenta la sostenibilidad en el transporte, con un enfoque especial en el papel del ferrocarril como una opción más limpia y accesible.
- Inversiones en infraestructura ferroviaria: La Comisión Europea ha asignado más de 7.000 millones de euros en subvenciones a 134 proyectos de infraestructura de transporte a través del programa *Connecting Europe Facility* (CEF) [20]. Proyectos clave incluyen la mejora de conexiones ferroviarias transfronterizas, como Rail Baltica o la implementación del Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario (ERTMS) en varias rutas [21]. Asimismo, en 2024, España recibió 241 millones de euros para financiar 15 proyectos [22]. Entre otros, se incluyen la electrificación de la línea Zaragoza-Teruel-Sagunto (78 millones de euros), la mejora de puertos en Barcelona, Valencia y Gijón (42 millones de

euros), y el desarrollo de terminales ferroviarias multimodales en Sagunto y Huesca.

Estos objetivos son similares en otros países como China, donde la red ferroviaria total del país ha superado los 160.000 kilómetros, de los cuales más de 46.000 kilómetros corresponden a líneas de alta velocidad. Cada tren puede transportar hasta unos 1.500 pasajeros, alcanza una velocidad máxima de 300 km/h y una velocidad media de 276 km/h [23]. Además, China está desarrollando trenes de alta velocidad aún más rápidos, como el modelo CR450, que podría reducir el tiempo de viaje en la línea Pekín-Shanghái a solo 2 horas y 30 minutos para 2025, operando a velocidades de hasta 400 km/h dado que se estima que aproximadamente 130,000 personas toman esta línea diariamente desde la estación de trenes del sur de Pekín, representando uno de los corredores ferroviarios más transitados de China [24].

Esta extensa inversión en la industria ferroviaria requiere de una gran fiabilidad en las comunicaciones de control de los trenes y una gran capacidad de comunicación de datos para los pasajeros [25] citeCui2023. En este sentido, varios países europeos están avanzando en la prueba y evaluación del FRMCS a través de proyectos piloto y fases de ensayo. Por ejemplo:

- Adif [26] está realizando pilotos para implementación de redes 5G en diez terminales logísticas estratégicas del país. Este proyecto tiene como objetivo principal digitalizar y automatizar las operaciones de estos centros, mejorando la eficiencia del transporte de mercancías. La infraestructura 5G permitirá el uso de aplicaciones avanzadas como la gestión inteligente del tráfico de mercancías y la monitorización de activos críticos mediante redes de Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*). Además, redes de operadores públicos de telefonía (MNOs, del inglés *Mobile Network Operators*) 5G en las áreas circundantes ofrecerá cobertura a los operadores de telecomunicaciones en áreas donde actualmente no sería económicamente viable desplegar este tipo de tecnología.
- Proyecto 5GRAIL [27]: financiado por la Unión Europea bajo el programa Horizon 2020, ha lanzado varios pilotos para implementar el sistema FRMCS para probar los primeros prototipos de esta tecnología en condiciones reales, tanto en laboratorios como en vías ferroviarias.

Se ha desarrollado un laboratorio de 5G para evaluar el rendimiento de FRMCS y su transición desde GSM-R. El proyecto 5GRAIL se llevó a cabo desde noviembre de 2020 hasta diciembre de 2023. Las primeras etapas se enfocaron en definir pruebas y desarrollar prototipos para la arquitectura de telecomunicaciones a bordo, integrando aplicaciones críticas como el Sistema Europeo de Control de Trenes (ETCS), voz, y sistemas de control y monitorización (TCMS). Luego, se llevaron a cabo pruebas de validación en laboratorio y en campo para garantizar la interoperabilidad, evaluar la ciberseguridad y validar la coexistencia con otros sistemas de comunicación de transporte.

El documento D1.2 [28] del proyecto identifica varios desafíos clave para las comunicaciones a alta velocidad (400 km/h) en entornos ferroviarios. Estos incluyen:

- **Problemas de Propagación:** El movimiento a alta velocidad genera cambios rápidos en el entorno radioeléctrico, lo que causa problemas significativos de propagación, como desvanecimiento y atenuación de las señales.
- **Interferencias:** Los trenes generan interferencia electromagnética que puede

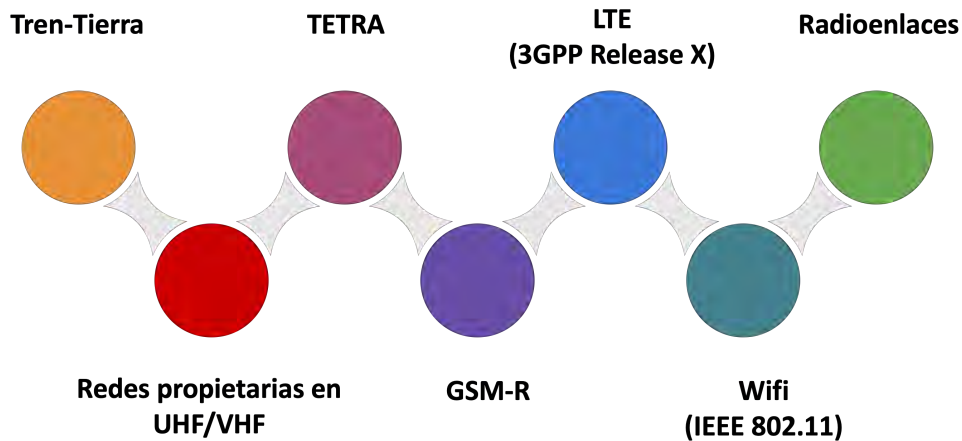
- degradar la calidad de la señal, especialmente en bandas de frecuencia altas utilizadas para 5G y otras tecnologías inalámbrica. Otra cause de interferencias son la interferencia de sistemas de comunicación circundantes y la causada por el cruce de trenes.
- **Bloqueo de la Señal por el Tren:** La estructura metálica del tren puede bloquear o atenuar las señales, lo que es especialmente problemático en túneles o áreas con cobertura limitada. Este fenómeno es más pronunciado cuando el tren se encuentra en movimiento.
  - **Retrasos en Comunicaciones Críticas:** Los problemas de propagación y las dificultades en los procesos de transición entre celdas o puntos de acceso aumentan la latencia, lo cual es crítico para las comunicaciones de misión, como voz, video o datos de sensores utilizados en los sistemas de seguridad de los trenes.
  - **Handover Sin Interrupciones:** A altas velocidades, el proceso de *handover* entre diferentes celdas de red o tecnologías móviles FRMCS/4G/5G puede producir interrupciones o retrasos.
- La Asociación público-privada ERJU (*Europe's Rail Joint Undertaking*) [29] propone, entre otras, una colaboración con MNOs para desarrollar el FRMCS. Esta colaboración sugiere soluciones alternativas llamadas de multicamino a través de redes privadas y cobertura mixta de MNOs en rutas ferroviarias, validación de interoperabilidad y confiabilidad, y explorar innovaciones que promuevan la sostenibilidad en el sector ferroviario.

El informe anual de 2023 [30] destaca los desafíos técnicos de modernizar las telecomunicaciones ferroviarias, incluyendo la implementación del FRMCS basado en tecnología 5G, que promete comunicaciones más rápidas y compatibles con aplicaciones críticas como el control de trenes y el mantenimiento remoto. Además, subraya el potencial de las tecnologías satelitales, como EGNOS y Galileo, para mejorar la precisión de la localización de trenes y reducir la dependencia de infraestructura terrestre, aunque enfrentan retos como interferencias o pérdida de señal. Por último, plantea el diseño de una arquitectura *multi-bearer* que combine redes móviles, satélites y fibra óptica, garantizando comunicaciones robustas y actualizables, fundamentales para la interoperabilidad y la redundancia en aplicaciones críticas.

Estos esfuerzos permitirán realizar los ajustes necesarios antes de proceder con una implementación más amplia [6] hacia la transición completa del FRMCS y otros sistemas de telecomunicaciones modernos en la industria ferroviaria. Esta transición, además, será un proceso gradual que requerirá la coordinación entre diferentes países y la superación de varios desafíos técnicos y logísticos. Por ello, resulta fundamental realizar investigación en distintos aspectos como las comunicaciones a alta velocidad (400 km/h), los problemas de propagación e interferencias, las limitaciones del uso de los sistemas de geolocalización para el posicionamiento, y los desafíos relacionados con el retardo en las comunicaciones críticas, entre otros, que son clave para garantizar una transición exitosa y eficiente hacia estas nuevas tecnologías.

## 1.1.2 Contexto tecnológico. Tipos de enlaces de comunicaciones en la actualidad

En los sistemas ferroviarios, varios tipos de enlaces de telecomunicaciones son esenciales para mantener las operaciones fluidas y seguras [31]. Estos enlaces permiten la transmisión de voz, datos y señales de control a lo largo de las rutas ferroviarias.



**Figura 1.1:** Tecnologías inalámbricas utilizadas en la actualidad en el ferrocarril en España

La Figura 1.1 presenta algunos de los tipos comunes de enlaces de telecomunicaciones inalámbricas utilizados en el ferrocarril actualmente. Cada uno de estos enlaces tiene características específicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones dentro del entorno ferroviario, desde la operación y control del tráfico hasta la provisión de servicios al pasajero y la gestión de emergencias.

### Radio Móvil Terrestre (TETRA, GSM-R, Tren-Tierra y otras redes propietarias UHF/VHF)

El GSM-R es el estándar internacional de comunicación móvil utilizado específicamente por operadores de ferrocarriles. Ofrece servicios de voz y datos [32]. La tecnología TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*) también es otro sistema de radio utilizado, proporcionando comunicaciones robustas y seguras.

Todos estos sistemas (también el Tren-Tierra y otras redes propietarias UHF/VHF) son utilizados para voz operacional o envío de unidades de kbps de datos.

Los sistemas como GSM-R están específicamente diseñados para aplicaciones ferroviarias, proporcionando comunicaciones seguras y confiables esenciales para operaciones de control y emergencias. Aunque son robustos y adaptados al entorno ferroviario, estas tecnologías enfrentan limitaciones de capacidad y velocidad en comparación con tecnologías más modernas como LTE o 5G, además de estar sujetas a la transición tecnológica hacia sistemas de comunicación más avanzados.

## Wi-Fi, LTE y LTE-R para aplicaciones ferroviarias

En algunos casos, las redes Wi-Fi (*Wireless-Fidelity*) y LTE (*Long Term Evolution*) se utilizan para proporcionar conectividad a bordo a los pasajeros y para ciertas operaciones operativas [33]. Estas tecnologías permiten la conexión de dispositivos móviles y pueden ser utilizadas para servicios de información al pasajero, así como para sistemas de mantenimiento y monitorización.

Las redes Wi-Fi proporcionan una conectividad conveniente para pasajeros y servicios no-críticos. No obstante, lo que actualmente la elimina como potencial sustituto tecnológico para ciertos servicios críticos.

LTE-R (*Long Term Evolution for Railway*) es una versión adaptada de la tecnología LTE diseñada específicamente para satisfacer las necesidades de comunicación del sector ferroviario [3]. Su arquitectura y características técnicas están optimizadas para la transmisión de datos a alta velocidad y la mejora de la fiabilidad en condiciones extremas. LTE-R se basa en el *Evolved Packet Core* (EPC) de LTE, que gestiona la transmisión de datos y la calidad de servicio (QoS) en la red. Sin embargo, a diferencia de LTE normal, LTE-R incorpora elementos adicionales para mejorar la cobertura y la fiabilidad en el entorno ferroviario, como el uso de pequeñas celdas y microceldas para mantener la conectividad en áreas donde la cobertura puede ser débil debido a la infraestructura del tren o el terreno. Además, el EPC de LTE-R puede ser implementado de manera distribuida para asegurar la fiabilidad en todo el trayecto, incluso en áreas rurales o en túneles, donde la conectividad tradicional es más difícil de mantener.

LTE-R se adapta con respecto a LTE para garantizar una latencia baja y una transmisión continua a velocidades de hasta 350 km/h [3] [34]. Para ello, LTE-R utiliza técnicas avanzadas como la modulación QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) y MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) para garantizar una mayor eficiencia espectral y mantener la calidad de la transmisión de voz, datos y vídeo en tiempo real. Asimismo, LTE-R está optimizado con técnicas como *handover* rápidas y gestión de interferencias. Además, LTE-R utiliza redes privadas o bandas de frecuencia dedicadas para evitar que las comunicaciones se vean afectadas por el tráfico en otras redes.

Finalmente, LTE-R está diseñado para ser interoperable con los sistemas existentes como GSM-R y TETRA para permitir una transición gradual y sin interrupciones hacia las nuevas tecnologías.

## Comunicaciones por satélite y radioenlaces

Las comunicaciones por satélite y los radioenlaces se emplean en áreas remotas donde otras formas de comunicación son menos viables. No obstante, su uso no es especialmente extendido debido a los actuales costes y debido a su mayor latencia [35]. Las comunicaciones satelitales son útiles para asegurar la cobertura en extensas redes ferroviarias que atraviesan regiones donde la infraestructura de telecomunicaciones terrestre es limitada.

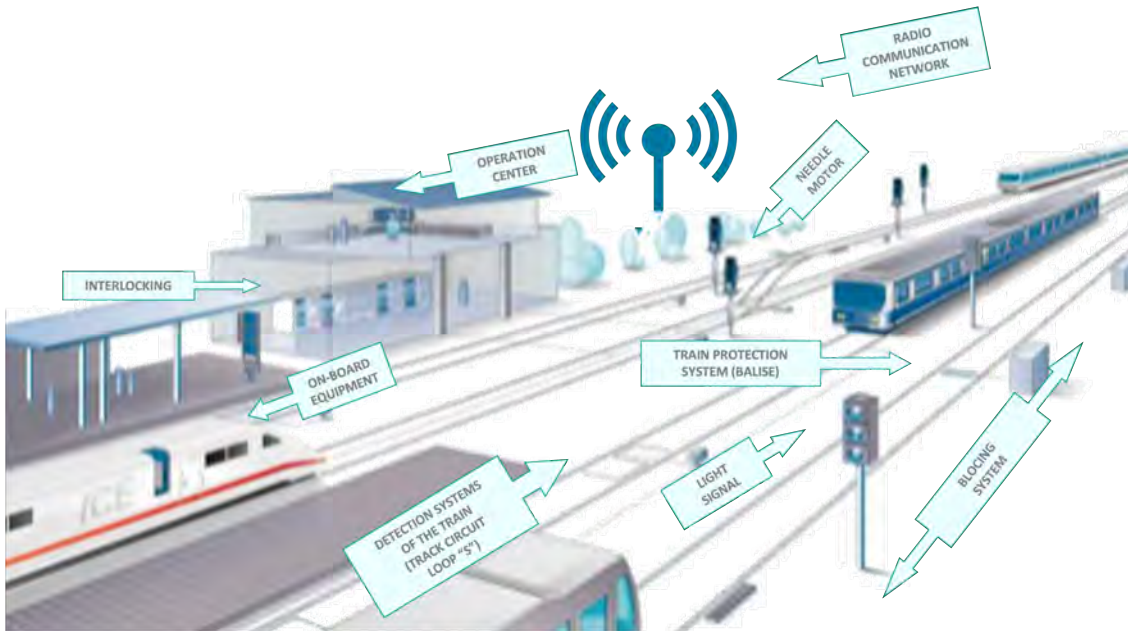
Por ejemplo, EFE (gestor ferroviario chileno) hace uso de tecnología de voz a través de comunicaciones satelitales para mejorar las comunicaciones en el servicio en zonas remotas

donde los sistemas tradicionales de radiocomunicación pueden fallar. Los teléfonos satelitales permiten una mayor fiabilidad y seguridad operativa, proporcionando un respaldo clave en situaciones de fallo de otros sistemas [36].

Estas comunicaciones suelen basar su tecnología en satélites de órbita baja (LEO) para reducir la latencia en la comunicación por voz. Son estos quienes reciben la señal de voz desde el teléfono satelital y la envían a estaciones terrestres quienes, luego, dirigen la llamada hacia la red telefónica terrestre o hacia teléfonos satelitales [37].

### 1.1.3 Necesidades y requerimientos de comunicaciones para el ferrocarril

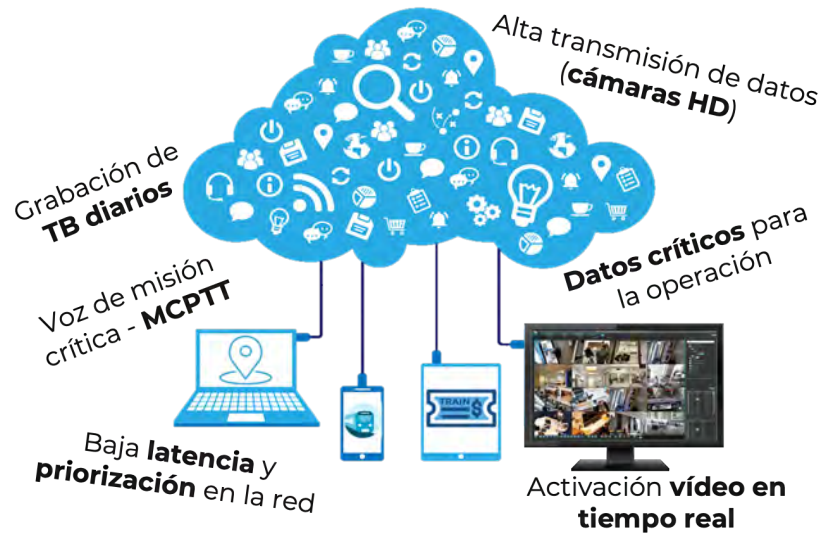
El entorno ferroviario tiene unas necesidades de comunicaciones específicas con respecto a otras industrias. Se compone de distintos actores para dar servicio a la operación y la señalización ferroviaria. La Figura 1.2 destaca componentes básicos del ferrocarril que requieren del apoyo de los sistemas de Telecomunicaciones. Algunos ejemplos son el centro de operaciones y la red de comunicación por radio, que permiten la gestión remota y el control del tráfico ferroviario. Además, se indican varios subsistemas importantes, como el enclavamiento (que gestiona la seguridad y los movimientos de las vías), los equipos a bordo de los trenes, y los sistemas de protección de trenes mediante balizas, que permiten la comunicación entre los trenes y la infraestructura para garantizar la seguridad operativa. También se muestran los sistemas de detección del tren mediante circuitos de vía, las señales luminosas, y el sistema de bloqueo, todos ellos esenciales para la regulación y control de los movimientos de los trenes, asegurando que operen de manera segura y eficiente dentro de la red ferroviaria.



**Figura 1.2:** Sistemas de Señalización y Control en la Infraestructura Ferroviaria

Asimismo, los servicios ferroviarios requieren de sistemas de videovigilancia, comunicaciones de voz y mantenimiento de trenes, interfaces externas con otros servicios, etc. [38] como

muestra la Figura 1.3. Además, los pasajeros disponen de comunicaciones 4G/5G con una disponibilidad y calidad moderadas [39].



**Figura 1.3:** Tipos de servicios para la industria del ferrocarril

Por ese motivo, una de las complejidades de las comunicaciones ferroviarias radica en la doble dimensión en las que se hallan, por un lado, en la relación a los servicios que proveen, y, por el otro lado, en el tipo de enlace de comunicaciones que pueden ser implementados. En este sentido, a pesar de tratarse de un sector de alto impacto en nuestra sociedad, los sistemas de comunicaciones implementados siguen siendo muy tradicionales y de muy alto coste en comparación con la variedad de soluciones que el sector de las telecomunicaciones es capaz de ofrecer hoy en día [37] [40].

Estos retos pueden alcanzarse con dos enfoques diferentes: el primero, un sistema de comunicaciones completo capaz de proporcionar todos los servicios en conjunto, lo que significa que los servicios críticos del tren compartirían canal de comunicación con las comunicaciones de pasajeros y las comunicaciones intra-tren para los equipos de a bordo; el segundo enfoque consiste en utilizar dos o más redes diferentes, una para las comunicaciones críticas y otras para las comunicaciones no críticas [41].

Actualmente, el enfoque de la mayoría de gestores de infraestructura ferroviaria, prefiere tomar la vía de la segunda opción dado que un entorno de redes homogéneas permite una evolución dispar y, sobre todo, garantiza un aislamiento de servicios, sobre todo en los referidos a los críticos.

En otras palabras, para llevar a cabo un enfoque de tecnologías homogéneas, se han de analizar separadamente las distintas casuísticas de las necesidades de comunicaciones para el ferrocarril en su conjunto, las cuales se pueden resumir de la siguiente manera:

- Comunicaciones de baja capacidad de datos con alta fiabilidad y disponibilidad para los servicios críticos de la misión del tren: control, señalización, vigilancia y mantenimiento.
- Despliegue de una red de comunicaciones para los equipos embarcados en el tren.

- Despliegue de comunicaciones de alta capacidad de datos para servicios no vitales del tren: videovigilancia.
- Despliegue de comunicaciones de alta capacidad para pasajeros.

### Servicios críticos ferroviarios

Los sistemas de comunicaciones críticos se entienden como aquellos que garantizan la seguridad ferroviaria y la operación ferroviaria.

Los servicios relacionados con la seguridad y fiabilidad de los sistemas de transporte ferroviario son los sistemas de señalización que se encargan del control de movimientos y el control de los trenes. Estos servicios requieren una baja velocidad de transmisión de datos, baja latencia y muy alta fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) [42]. Estas comunicaciones transmiten principalmente la posición del tren, limitaciones de velocidad y autoridades de movimiento, por lo que un fallo en las comunicaciones no provocará un accidente, sino que degradará el rendimiento de la red ferroviaria, obligando a los trenes a reducir la velocidad, provocando frenos de emergencia en un tren (o conjunto de trenes) o incluso interrumpir completamente la operación ferroviaria hasta el restablecimiento de las comunicaciones.

Todos estos servicios pueden ser gestionados por el mismo sistema de comunicación, que debe tener una alta calidad de servicio dado que los operadores ferroviarios están acostumbrados a manejar un 99,999% de fiabilidad en sus sistemas de control y gestión de trenes [42].

A continuación, se describen los tipos de sistemas de señalización que existen:

- **Bloqueo Telefónico:** Sistema de señalización basado en la comunicación telefónica entre jefes de circulación para autorizar el paso de trenes a nuevos bloques de vía, obsoleto en la actualidad.
- **Sistemas de Bloqueo Automático:** Utiliza sensores para detectar la ocupación de los bloques de vía y ajustar automáticamente las señales, sin intervención humana directa.
- **Sistema de Control Automático de Trenes (ATC):** Automatiza el control de trenes supervisando velocidad y posición, incluyendo el Sistema Automático de Protección (ATP) y el Sistema Automático de Operación (ATO).
- **Sistema Europeo de Control de Trenes (ETCS):** Estándar de señalización ferroviaria en Europa que usa niveles de comunicación avanzados con balizas y radio GSM-R, eliminando señales físicas en algunos niveles.
- **Control de Trenes Basado en Comunicaciones (CBTC):** Sistema de señalización que emplea redes inalámbricas para automatizar la operación de trenes, optimizando distancias y aumentando la frecuencia del servicio.

En los sistemas ferroviarios, donde los enclavamientos y la señalización dependen de comunicaciones precisas, cualquier interrupción puede afectar la operativa de los trenes. Estos sistemas son vitales porque controlan aspectos físicos de la vía, como los cambios de agujas y las señales, para garantizar el paso seguro de los trenes. La desconexión en las comunicaciones puede obligar a detener los servicios hasta que se restablezca la conexión y se verifique el

estado del sistema. Además, aunque los sistemas de señalización y control son fundamentales para la seguridad, otros servicios esenciales permiten la operación diaria de la red ferroviaria, asegurando un funcionamiento eficiente y continuo. Algunos ejemplos de estos sistemas incluyen:

- **Voz operacional:** Es la comunicación verbal entre los actores ferroviarios, esencial para coordinar actividades diarias y garantizar operaciones eficientes, utilizando frecuentemente sistemas como GSM-R.
- **Gestión del Tráfico y Planificación:** Involucra la coordinación de horarios, asignación de vías y recursos para optimizar el tráfico ferroviario, mejorando la puntualidad y adaptándose a imprevistos.
- **Mantenimiento Predictivo y Correctivo:** Garantiza el buen estado de la infraestructura ferroviaria mediante mantenimiento preventivo y predictivo, utilizando datos en tiempo real para anticipar fallos.
- **Gestión de la Energía:** En redes ferroviarias electrificadas, optimiza la distribución de energía, monitoriza el consumo y asegura la capacidad adecuada para satisfacer las demandas de los trenes.

### Servicios no-críticos ferroviarios

Los sistemas de comunicaciones no-críticos o de apoyo a la operación ferroviaria son los que afectan indirectamente a la circulación de los trenes, considerándose no-críticos porque no son necesarios para la explotación directa del sistema ferroviario.

- Sistemas de billeteaje, y control de accesos.
- Servicios de información al pasajero.
- Videovigilancia y control de accesos.
- Conectividad para pasajeros.

### Tecnologías de comunicaciones inalámbricas

A la hora de diseñar y seleccionar las tecnologías de comunicaciones inalámbricas o móviles a utilizar en cada escenario. Actualmente, el FRMCS es el estándar que será implementado como sustituto del GSM-R (Sección 1.1.4. No obstante, su carácter flexible y adaptable, así como la fase de estandarización en la que se halla, requieren de una serie de consideraciones básicas a la hora de implementar una nueva tecnología de telecomunicaciones.

La primera pregunta se enfoca en la tecnología disponible en el mercado, planteando si se debe optar por la tecnología más reciente o por soluciones más maduras y probadas, un aspecto crítico para equilibrar innovación y estabilidad en la red, señalando si la red soportará 5G y si será independiente, lo que podría garantizar un mejor control sobre la infraestructura. Este tema enlaza con el desarrollo de *Releases* explicado en la Sección 1.1.5.

La segunda pregunta trata sobre la disponibilidad de espectro radioeléctrico. Por un lado, trata de la elección de la banda de frecuencia más adecuada, según se el estado del arte de la

cuestión tal y como indica la Sección 1.1.6. Por el otro lado, depende del uso de esa banda en términos de hacer uso de bandas privadas asignadas al ferrocarril, alquilar espectro a terceros, firmar acuerdos de servicio con operadores existentes o hacer uso de bandas de frecuencia libres.

En el tercer bloque, se discuten las necesidades del enlace en relación a los parámetros básicos de cada servicio y enlace, es decir, requerimientos de nivel de señal, latencia, transmisión de datos, entre otros, como se indica en la Sección 1.1.7.

### 1.1.4 FRMCS

El FRMCS es el sistema futuro de comunicaciones móviles ferroviarias, promovido por la UIC (*International Union of Railways*). Está destinado a reemplazar el sistema GSM-R actual y servirá como el estándar global para las comunicaciones de la red ferroviaria, alineándose con las innovaciones tecnológicas más recientes, como las redes 5G, IoT y el análisis masivo de datos. El FRMCS está diseñado para mejorar la eficiencia operativa, la seguridad y permitir una interoperabilidad avanzada entre los operadores ferroviarios internacionales [43].



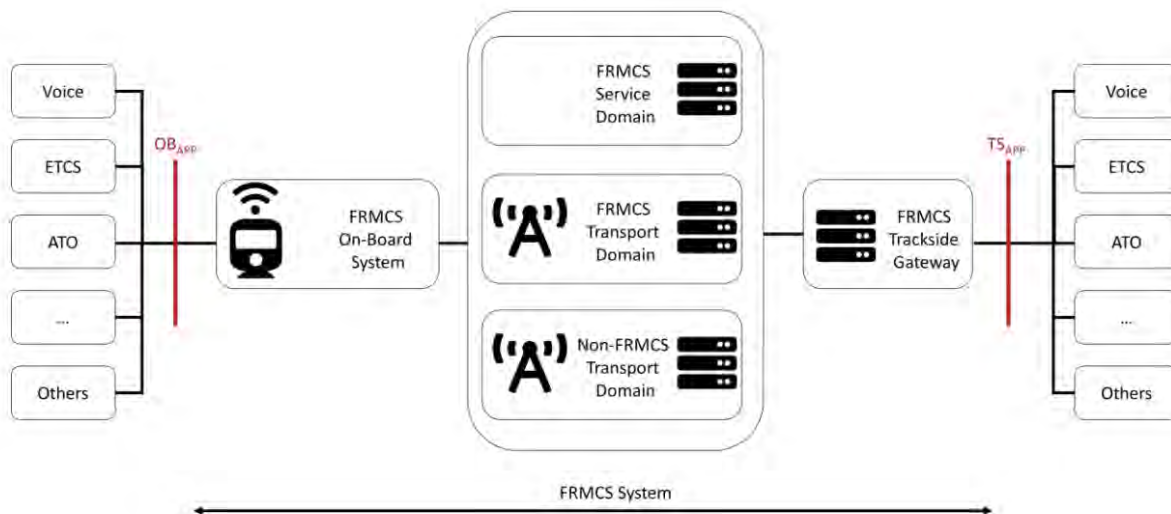
**Figura 1.4:** Mejoras introducidas por el FRMCS en relación con el GSM-R

El FRMCS se plantea como una evolución que mantiene las ventajas que proponía el GSM-R con la inclusión de las tecnologías actuales como parte de la mejora para la industria ferroviaria (ver Figura 1.4). Con ello, se asegura una mayor capacidad, velocidad y latencia reducida, permitiendo una interoperabilidad mejorada y soporte para aplicaciones críticas y de alta demanda, como sistemas automáticos de control de trenes, gestión del tráfico y monitorización en tiempo real [44] [45].

La arquitectura del FRMCS se encuentra en fase de estandarización [46]. La Figura 1.5 muestra la definición actual de la arquitectura del FRMCS, la cual está sujeta a cambios dado que se basa en la fase de estandarización y no se ha concluido aún la primera versión

estable del estándar<sup>1</sup>. En ella se describe cómo, a contrario de lo que se hizo con GSM-R, los servicios están desacoplados de la tecnología radio utilizada. Por tanto, su definición no incluye el tipo de tecnología a implementar con el fin de permitir la mayor competición posible del mercado. No obstante, parece que la tendencia indica que el mejor candidato tecnológico a cubrir esta necesidad es el 5G dado que incluso los estándares del 3GPP incluyen dentro de sus definiciones necesidades propias del FRMCS.

La integración con tecnologías 5G ofrece oportunidades para conectar de manera avanzada el entorno ferroviario, mientras que la flexibilidad y escalabilidad de FRMCS permitirán adaptarse a las necesidades cambiantes del sector. Se espera que la implementación de FRMCS mejore la eficiencia operativa al permitir una comunicación más rápida y fiable entre trenes y centros de control, facilitando así una gestión más eficaz del tráfico ferroviario. Además, el sistema soportará aplicaciones avanzadas como el control automático de trenes y la monitorización en tiempo real, lo que incrementará la seguridad y la eficiencia en las operaciones [47].



**Figura 1.5:** Arquitectura del FRMCS según la actual definición del sistema [48]

A continuación, se desglosan los componentes y principios técnicos clave que sustentan esta arquitectura, así como los principios básicos de diseño. Se detallan las múltiples tecnologías de acceso radio y *Decoupling* de servicios y transporte, cómo son los equipos embarcados y la cronología y versiones de esta tecnología.

### Múltiples tecnologías de acceso radio y *Decoupling* de servicios y transporte

El FRMCS soporta una amplia gama de tecnologías de acceso, como LTE, 5G y Wi-Fi, lo que permite que las aplicaciones ferroviarias operen en diferentes entornos sin interrupciones. Este enfoque asegura que las redes ferroviarias existentes, como las basadas en GSM-R, puedan migrar a FRMCS de manera progresiva [49].

<sup>1</sup>Diciembre de 2024

El **desacoplamiento** (*decoupling*) en los servicios del FRMCS es una estrategia fundamental que permite a los distintos componentes del sistema ferroviario operar de manera independiente y con menos interdependencias rígidas. Este enfoque ofrece flexibilidad y escalabilidad, así como una independencia entre los componentes del sistema, como el Sistema Embarcado (*On-Board*), la puerta de enlace de Vía (*Trackside Gateway*) y el Dominio de Servicios (*Service Domain*), intercambiar información sin depender de una única infraestructura o tecnología fija.

Asimismo, la arquitectura desacoplada del FRMCS permite que nuevas tecnologías se introduzcan sin necesidad de realizar modificaciones exhaustivas en el sistema completo. Esto significa que, a medida que las tecnologías de comunicación avanzan, es posible integrar estas mejoras en el sistema de transporte sin interrumpir los servicios operativos actuales.

Este principio también se basa en un requerimiento crítico de los sistemas actuales relativos a la interoperatividad. Los distintos sistemas de comunicación y servicios pueden interactuar de manera estandarizada, incluso si se desarrollan en plataformas tecnológicas diferentes. Esto es crucial cuando se tienen sistemas de diferentes fabricantes o generaciones.

En términos específicos, FRMCS aplica el desacoplamiento mediante la definición de distintos dominios funcionales (por ejemplo, Dominio de Transporte, Dominio de Servicios y Dominio de Aplicaciones) y puntos de referencia, como *OB<sub>APP</sub>* (para aplicaciones a bordo) y *TS<sub>APP</sub>* (para aplicaciones en vía). Esto define una interfaz estándar que facilita la interoperabilidad entre aplicaciones embarcadas y en vía sin dependencia directa de un solo protocolo o infraestructura de red.

Por ejemplo, la **infraestructura de MCX** (Misión-Crítica) dentro del Dominio de Servicios proporciona un núcleo que facilita las comunicaciones de misión crítica desacopladas de los sistemas específicos de *hardware* a bordo o en vía. Así, las aplicaciones pueden aprovechar los servicios de comunicación y de seguridad (MCX) sin estar limitadas por la tecnología de red específica que utilicen en cada ubicación o unidad ferroviaria.

Este principio de arquitectura básico del FRMCS ya se ha probado a través de una serie de eventos organizados por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) en colaboración con la Comisión Europea y la Asociación Europea de Libre Comercio (EFTA) [50] [51] [52] [53]. El objetivo principal de este *Plugtests* es validar la interoperabilidad de diversas implementaciones del FRMCS utilizando diferentes escenarios de prueba basados en el marco de Servicios Críticos de Misión (MCX) definidos por el 3GPP, con un enfoque especial en las características específicas del sector ferroviario. Se evalúan equipos como servidores y clientes MCX compatibles con FRMCS, equipos de usuario y radios de cabina, componentes eMBMS (servicio *multicast* de difusión multimedia evolucionado), consolas y salas de control, equipos de prueba, equipos de acceso radio (RAN) 5G y núcleos de paquetes 5G.

## Equipos embarcados FRMCS

Los equipos embarcados, al igual que el espectro radioeléctrico (ver Sección 1.1.6), son otro de los temas complejos en esta transición hacia el FRMCS, dado que unificar su transición e interoperabilidad es un gran reto a nivel internacional. Asimismo, su convivencia con GSM-R también presenta grandes retos a la hora de hacer realidad esta nueva tecnología.

La arquitectura de los equipos embarcados incluye dos tipos de *gateways* [48]: uno a bordo del tren (On-Board Gateway, OB GTW) y otro a nivel de la infraestructura de la vía (Trackside Gateway, TS GTW). Estos *gateways* gestionan la conexión entre las aplicaciones y la red de transporte. En el lado del tren, el OB GTW se conecta a la red de acceso por medio de módems FRMCS que están optimizados para 5G y otras tecnologías de acceso. Además, los *gateways* se encargan de manejar las conexiones IP y mantener la continuidad de las sesiones cuando los trenes cruzan fronteras o cambian entre diferentes redes.

## Cronología y versiones del FRMCS

El desarrollo del sistema de comunicaciones móviles ferroviarias del futuro (FRMCS) ha seguido una cronología estructurada, impulsada por la necesidad de reemplazar el sistema GSM-R obsoleto y adaptarse a las modernas necesidades de comunicación en el sector ferroviario.

Los primeros estudios para FRMCS comenzaron alrededor de 2015, marcando el inicio de los esfuerzos para crear un sistema de comunicaciones de próxima generación para los ferrocarriles. Entre 2015 y 2017, la Agencia Europea de Ferrocarriles (ERA) inició los estudios para definir los requisitos técnicos. Durante estos años, se llevaron a cabo investigaciones y análisis sobre el uso de nuevas tecnologías, como el 5G, entre otras, para mejorar la conectividad y la eficiencia operativa en el sector ferroviario, especialmente para garantizar comunicaciones confiables a altas velocidades.

En 2018, se establecieron las especificaciones iniciales de FRMCS, basadas en los resultados obtenidos de los estudios previos. Los principales focos de estas especificaciones fueron mejorar la fiabilidad y la capacidad de manejar comunicaciones en condiciones extremas, como las que se presentan en túneles o áreas rurales, donde la cobertura de GSM-R era limitada. También se comenzó a trabajar en la creación de una infraestructura adecuada para soportar FRMCS.

A partir de 2019, la ERA y la Comisión Europea iniciaron la planificación para la transición de GSM-R a FRMCS, con la proyección de que la implementación total se realizaría entre 2025 y 2030. Durante este período, se asignaron frecuencias dedicadas para FRMCS en Europa, en colaboración con el Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC), y se comenzó a trabajar en la interoperabilidad entre los sistemas existentes y FRMCS.

En 2020, comenzaron los primeros proyectos piloto, como el proyecto 5GRAIL, comentado en la Sección 1.1.1 que tenía como objetivo probar la viabilidad de FRMCS en condiciones operativas reales [54].

En 2021, se finalizó la publicación de las especificaciones preliminares de FRMCS. Estas especificaciones fueron continuamente ajustadas y mejoradas a medida que se obtenían los resultados de las pruebas.

Entre 2021 y 2022, el foco se centró en garantizar la interoperabilidad entre FRMCS y los sistemas de comunicación existentes, como GSM-R y TETRA. También se llevaron a cabo pruebas adicionales sobre la cobertura en zonas rurales y túneles, donde la provisión de cobertura supone un reto más complejo.

De 2022 a 2023, se continuó el desarrollo y ajuste de FRMCS, preparándose para un despliegue más amplio. A medida que las pruebas piloto llegaron a su fin, se planificó el despliegue a

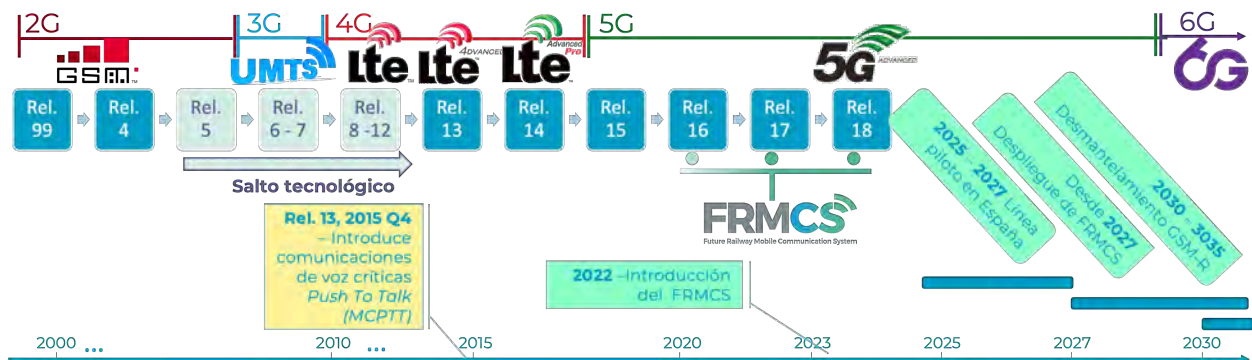
gran escala en algunos países. Los principales operadores ferroviarios como SNCF (Francia) y Deutsche Bahn (Alemania) están planeando la transición de GSM-R a FRMCS entre 2026 y 2035, con Francia apuntando a una transformación completa de la red para 2030 [55].

Por su parte, el desarrollo de la estandarización del FRMCS se ha estructurado en varias versiones, cada una con objetivos y avances específicos:

- FRMCS Versión 1.0 (V1.0) [56]: Esta versión inicial se centró en establecer las especificaciones básicas y los requisitos del sistema. Se publicó en 2021 y sentó las bases para el desarrollo de FRMCS, definiendo las funcionalidades esenciales y la arquitectura del sistema.
- FRMCS Versión 2.0 (V2.0) [57] [58]: La segunda versión tiene como objetivo ampliar las especificaciones para incluir funcionalidades avanzadas y preparó el camino para pruebas más extensas. Su publicación estaba programada para completarse en el primer trimestre de 2024. Sin embargo, hasta la fecha<sup>2</sup>, no se ha publicado información oficial que confirme la finalización de esta versión. Se espera que V2.0 sea validada a través del proyecto europeo MORANE 2 [59], que tiene como objetivo realizar ensayos a nivel europeo para garantizar la interoperabilidad y la eficacia del sistema.
- FRMCS Versión 3.0 (V3.0) [58]: Será la primera versión estable para el desarrollo comercial de FRMCS. Su publicación está prevista para 2027 e incorporará los resultados de las pruebas y validaciones anteriores, ofreciendo una especificación completa y lista para su implementación en el sector ferroviario. Una vez esta versión esté publicada, el desarrollo comercial de los primeros equipos FRMCS del mercado pueden demorarse unos dos años más.

### 1.1.5 Evolución de *Releases* de 3GPP para FRMCS

El FRMCS basa su parte de comunicaciones móviles en el estándar 5G de telecomunicaciones móviles, definido por la *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) [60]. La 3GPP es la organización encargada de desarrollar los estándares para las tecnologías móviles, y su conjunto de estándares 5G es fundamental para FRMCS.



**Figura 1.6:** Línea temporal del progreso de las comunicaciones móviles en el ferrocarril

<sup>2</sup>en Diciembre de 2024

Como se indicaba en la Sección 1.1, el GSM-R basó su tecnología en GSM, o Release 99. No obstante, los estándares de comunicaciones móviles fueron avanzando, como se indica en la Figura 1.6, donde se representa una línea temporal aproximada del progreso de implementación de las redes GSM-R hacia las redes FRMCS [61].

Desde finales de los años 90 hasta más allá de 2010, el ferrocarril hizo pocos progresos en la implementación de redes móviles para su uso en las comunicaciones críticas. No obstante, gracias a la implementación de MCPTT (*Mission Critical Push To Talk over LTE*) o comunicaciones para servicios de emergencias (ver Figura 1.7), la industria volvió a revisar su tecnología existente.

A continuación se describe la evolución de las tecnologías de red FRMCS en las versiones de 3GPP, discutiendo tanto los desafíos como las perspectivas futuras que enfrentan estas tecnologías en su implementación [62].

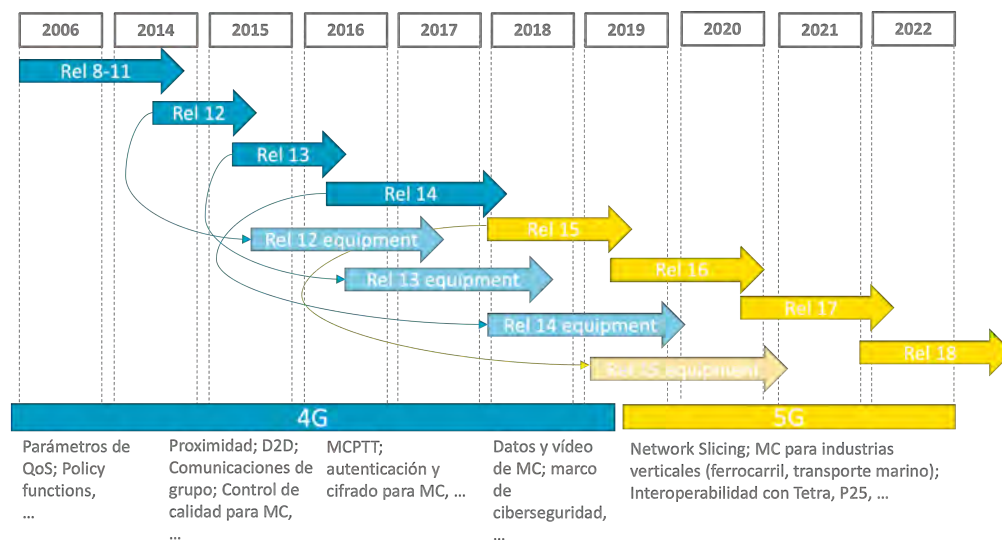


Figura 1.7: Resumen de aplicaciones por Releases y años de desarrollo de las mismas

### Servicios de misión crítica

La **Release 12** (2014) [63] se trata principalmente de una adaptación a LTE de la capacidad del servicio de llamada de grupo de voz de GSM-R (o capacidad equivalente de TETRA o P25) para gestionar la comunicación de grupo. Es en el primer momento que se unifican ambas tecnologías dentro de una evolución del estándar 3GPP. Permite una comunicación de grupo eficaz, con grupos dinámicos con usuarios móviles y despachadores. Admite grupos grandes (hasta varios miles de usuarios) y ofrece continuidad de servicio para transiciones entre portadores unicast y multicast. Estrechamente relacionada con la comunicación de grupo está una nueva función exclusiva de LTE, también introducida en la versión 12, denominada servicios basados en la proximidad (ProSe). ProSe permite a los dispositivos detectar otros dispositivos próximos y comunicarse directamente con ellos.

En la **Release 13** [64] se introduce MCPTT. En este caso, el objetivo principal es la seguridad pública (los servicios de emergencia), para los que es una funcionalidad esencial, pero también

puede utilizarse para usos comerciales, como las empresas ferroviarias dado que el MCPTT es la solución del 3GPP para sustituir a las antiguas redes dedicadas utilizadas por la policía, los bomberos, etc. Admite comunicaciones entre varios usuarios (llamada de grupo) y entre pares de usuarios (llamadas privadas). Funciona cuando hay cobertura LTE (dentro de la red), haciendo uso de la cobertura LTE estándar, y también cuando no la hay (fuera de la red), utilizando la ruta de comunicación ProSe E-UTRA directa (UE-a-UE).

En la **Release 14** [65] [66], la MCPTT de la *Release 13* se mejora con nuevas funcionalidades, entre las que se encuentran, además del MC para voz, datos (MCData) y vídeo (MCVideo).

A partir de la **Release 15** [67], el sistema de comunicaciones móviles para ferrocarriles introduce otros servicios de comunicación además de la comunicación de emergencia en grupo. Entre los que se hallan servicios de baja latencia y alta fiabilidad de los datos y el servicio de vídeo en el entorno de los trenes de alta velocidad.

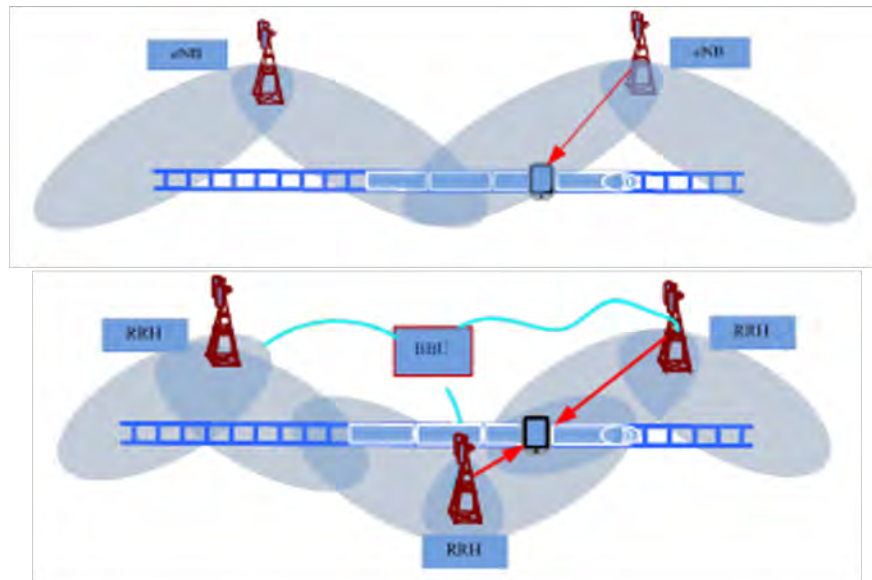
- Conectividad sin fisuras en entornos ferroviarios de alta velocidad,
- Servicio de datos y vídeo de baja latencia y alta fiabilidad,
- Supervisión y gestión de trenes en tiempo real para un funcionamiento seguro de los trenes,
- Seguimiento fiable de la ubicación, incluido el estado de los túneles,
- Interfuncionamiento de comunicaciones ferroviarias heredadas con el sistema GSM-R,
- Formas especializadas de direccionamiento utilizadas para la comunicación ferroviaria.

La *Release 15* introduce las llamadas de grupo MCPTT (mientras están en red) para dar un direccionamiento basado en roles para ferrocarriles; en cuanto a MCPTT, ahora soporta control de hablante multiusuario, una forma adicional de control de planta que permite un número definido de hablantes hablando al mismo tiempo en una comunicación de grupo en lugar de un solo hablante a la vez.

La **Release 16** [68] [69] [70] incluye especificaciones adicionales para satisfacer las necesidades específicas de comunicación de los ferrocarriles en llamadas privadas (alias funcionales) y de grupo MCPTT y para permitir el uso de alias funcionales en llamadas privadas MCPTT, MCVideo y el servicio MCData.

Las principales novedades funcionales son: la funcionalidad de llamada de grupo; la compatibilidad con servicios complementarios para la comunicación ferroviaria (llamadas privadas). Se incluyen definiciones para el funcionamiento interoperable entre FRMCS y GSM-R.

La **Release 17** [71] [72] [73] [74] [75] introduce el servicio de conectividad IP MCData para admitir alias funcionales y un usuario de servicio MC puede seleccionar un alias funcional según la llamada de misión crítica. Un usuario de servicios MC puede ahora solicitar una prioridad de capa de aplicación, lo que permite el arbitraje de múltiples solicitudes de servicio por parte de los servidores de servicios MC.



**Figura 1.8:** Utilización por los trenes de alta velocidad de los eNB LTE estándar (red de frecuencia no única) vs Utilización de una red de frecuencia única (SFN) específica [76]

### Adaptaciones de radio superar los 350 km/h y la definición de la Nueva Radio (NR)

El estándar de 3GPP también aborda el impacto en el sistema de los móviles que se desplazan a velocidades cercanas o superiores a 350 km/h permaneciendo a nivel del suelo (es decir, no en aviones). De hecho, en las especificaciones del 3GPP, la velocidad máxima garantizada es de 350 km/h, pero algunos trenes de alta velocidad superan regularmente los 350 km/h.

La *Release 13* tenía como objetivo evaluar el rendimiento de LTE para los UE que se mueven a velocidades de hasta 350 km/h. Como resultado de este estudio, no se elaboró ninguna norma en esta versión.

En la *Release 14*, este estudio llevó a mejorar las prestaciones de movilidad y caudal para especificar los requisitos de gestión de recursos radioeléctricos (RRM) de UE, demodulación de UE y demodulación de estación base, teniendo en cuenta los dos tipos de despliegues prácticos de los operadores.

El primer caso, que se muestra en la Figura 1.8, es aquel en el que no se despliega ninguna instalación específica para gestionar trenes de alta velocidad, es decir, los UE del tren utilizan los eNB LTE estándar. El segundo caso, mostrado en la Figura 1.8, describe el despliegue de una red de frecuencia única (SFN). Una SFN utiliza antenas específicas desplegadas a lo largo de la vía del tren, denominadas *Remote Radio Heads* (RRH). En este caso, la unidad de banda base (BBU) está conectada a la RRH, por ejemplo, mediante fibra óptica.

En comparación con la solución anterior (uso de LTE estándar), esta solución SFN proporciona una mejor conectividad, pero a un coste mayor.

En la *Release 14*, las mejoras se enfocaron en optimizar el rendimiento de las redes LTE de frecuencia única, limitadas a velocidades de hasta 350 km/h. Se mejoraron aspectos relaciona-

dos con la RRM, la demodulación del equipo de usuario y la estación base, especialmente en redes no SFN y SFN. Estos avances redujeron la latencia en el reconocimiento de celdas, optimizando así la experiencia en escenarios de alta velocidad.

En la *Release 16* (2020), se introdujeron avances adicionales para soportar la agregación de portadoras (CA) y velocidades de hasta 500 km/h. Se mejoraron los requisitos de RRM y demodulación tanto para redes SFN como no SFN, con un enfoque en la eficiencia en redes con CA, reduciendo aún más los tiempos de identificación de celdas y mejorando los procesos de medición. Además, se añadieron requisitos adicionales para garantizar el rendimiento en escenarios de alta velocidad, cubriendo tanto redes TDD (*time division duplex*) como FDD (*frequency division duplex*).

En la *Release 16* para 5G NR, se especificaron los requisitos RRM y de demodulación para el escenario de trenes de alta velocidad (HST) en el rango de frecuencias 1 (FR1) (ver Tabla 1.1), con soporte para velocidades de hasta 500 km/h y frecuencias de hasta 3.6 GHz. Los requisitos abarcan tanto la medición intra-RAT como inter-RAT, con mejoras en la gestión de haces y re-selección de celdas.

**Tabla 1.1:** Los dos rangos de frecuencias NR: FR1 y FR2

Rango de frecuencia	Rango de frecuencia	Ancho de banda de canal soportado [MHz]
FR1	410 MHz – 7125 MHz	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100
FR2	24250 MHz – 52600 MHz	50, 100, 200, 400

En la **Release 17**, se ampliaron estos requisitos para incluir la agregación de portadoras (CA), manteniendo el enfoque en garantizar la movilidad a altas velocidades. Para el rango de frecuencias 2 (FR2), la Release 17 introdujo el soporte para trenes de alta velocidad con frecuencias de hasta 30 GHz.

La **Release 18** de 3GPP [77], conocida como *5G-Advanced*, fue terminada en el Q2 de 2024. Esta versión introduce avances en áreas clave como MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), que incrementa la capacidad y cobertura de la red, permitiendo comunicaciones más robustas en entornos ferroviarios. Además, integra Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático en la gestión de recursos de red, lo que optimiza la eficiencia en condiciones variables. La *Release 18* también incluye soporte para dispositivos de baja complejidad (RedCap), facilitando la incorporación de sensores IoT esenciales para el mantenimiento predictivo en ferrocarriles. Finalmente, las mejoras en comunicaciones *sidelink* (directas entre dispositivos) fortalecen las aplicaciones de comunicación entre trenes y entre trenes e infraestructuras, mejorando la interoperabilidad y seguridad de FRMCS en su transición desde GSM-R.

La **Release 19** de 3GPP [78] está en desarrollo y se espera que introduzca mejoras significativas para el sector ferroviario. Aunque su contenido aún está en discusión, se anticipa que su publicación ocurra en el tercer trimestre de 2025. Según la información disponible, la fecha de finalización de la *Release 19* está programada para diciembre de 2025.

## Modalidades de implementación de la red

Los estándares del 3GPP permiten una gran flexibilidad a la hora de hacer un diseño de implementación de red. Existen diversos modelos de redes 5G en el sector del transporte.

- Redes privadas. Uno de ellos es la red aislada construida directamente por la empresa de transporte, con infraestructura completamente privada y frecuencias locales, lo que garantiza baja latencia y seguridad, pero con altos costos de implementación y dificultades en la adquisición del espectro. Es la modalidad de implementación más común actualmente.
- *RAN Sharing*. Consiste en compartir la infraestructura de radio entre la red privada de la empresa y una red pública. En este caso, la empresa gestiona su propia red y usuarios, mientras comparte los recursos de la RAN. Una variante de este enfoque es compartir tanto la RAN como el plano de control entre la red pública y la privada, lo que implica que el operador público también gestiona parte de la red y de los usuarios.
- Núcleo 5G independiente (*Standalone Core*). Permite una mayor flexibilidad y control sobre la red, optimizando el rendimiento de las comunicaciones críticas. Permite al gestor de infraestructura ferroviaria gestionar únicamente los usuarios u otras funciones requeridas y dejar al MNO la gestión de la red y de recursos propios del sistema móvil.
- El *network slicing* o segmentación de red es una técnica utilizada en redes 5G que permite dividir una infraestructura de red física en varias redes virtuales independientes, conocidas como *slices* o segmentos. Cada uno de estos segmentos se configura y adapta para cumplir con requisitos específicos de servicio o aplicación. De esta manera, diferentes tipos de servicios, como internet móvil, realidad virtual o aplicaciones críticas, pueden

coexistir en la misma red, pero sin interferir entre sí, ya que cada segmento opera como si fuera una red propia [79].

Este mecanismo de 5G tiene su uso en el ferrocarril para mejorar la eficiencia y la seguridad en las comunicaciones y operaciones. Como se describe en la Sección 1.3, los sistemas de telecomunicaciones son utilizados múltiples servicios con diferentes necesidades desde el punto de vista de la transmisión de datos o voz. En este sentido, la segmentación de red podría aplicarse al ferrocarril para mejorar la eficiencia y la seguridad en las comunicaciones y operaciones. Los casos de uso mencionados presentan diferentes requerimientos de telecomunicaciones, dependiendo de la criticidad, velocidad de transmisión y capacidad de los datos.

- *Service Level Agreement* (SLA). Se trata de un contrato en el que se definen los niveles de servicio esperados entre un proveedor de servicios y un cliente. Este acuerdo establece parámetros clave de calidad y rendimiento, asegurando que el servicio proporcionado cumpla con los requisitos mínimos establecidos en términos de disponibilidad, cobertura y calidad de la red. El SLA detalla las obligaciones del proveedor y especifica los niveles de rendimiento que deben cumplirse para garantizar una experiencia de usuario adecuada.
- Uso de MNOs. Se presentan diversas opciones de implementación de redundancia para asegurar la disponibilidad continua de los servicios críticos, como el uso del *roaming* nacional, que permitiría a la red operar en áreas cubiertas por otros operadores, o la creación de redundancia interna dentro de un solo operador para mayor fiabilidad. También se considera la posibilidad de trabajar con un operador virtual, lo que podría ofrecer flexibilidad adicional en la gestión de los recursos de red, o incluye *multipath* incluyendo redes privadas y redes MNOs trabajando en paralelo para mejorar el diseño de redundancia.

### 1.1.6 Espectro radioeléctrico

Los entornos de transporte hacen uso del espectro radioeléctrico según las necesidades de enlace. Por ese motivo, a continuación se hace una revisión de las distintas bandas posibles a utilizar en el ferrocarril, considerando los recientes estudios realizados al respecto.

#### Uso del espectro en el ferrocarril actualmente y plan para FRMCS

Para el sistema de comunicaciones ferroviarias en España, se utilizan varias bandas de frecuencia, incluyendo las bandas 874-880 MHz y 919-925 MHz, así como la banda de 1900-1910 MHz, que se destinan a sistemas de comunicación que incluyen el GSM-R. Además, se están considerando bandas adicionales como las de 900 MHz y 1800 MHz, según la normativa europea, para apoyar la transición a sistemas más avanzados como el FRMCS [80] [81]. Por otro lado, hay asignaciones de espectro para las comunicaciones críticas de datos, particularmente con la llegada del 5G, que se espera que desempeñe un papel clave en la modernización de las redes ferroviarias. .

También se incluyen las bandas de 2600 MHz y 3600 MHz [81], que se encuentran en el

espectro de frecuencias medias y ofrecen mayores velocidades de datos. Estas bandas son útiles para soportar aplicaciones avanzadas de IoT y para la transmisión de video en tiempo real. Son especialmente utilizadas en áreas densas que requieren una alta capacidad de datos ya que son especialmente beneficiosas para la transmisión de video en tiempo real desde los trenes hacia los centros de control, mejorando la seguridad y la monitorización.

### Ondas milimétricas

Aunque las bandas de ondas milimétricas, por encima de 24 GHz, no se utilizan ampliamente en aplicaciones ferroviarias actuales debido a su limitada capacidad de penetración y cobertura, su potencial en entornos controlados abre nuevas oportunidades para el futuro. Estas bandas podrían utilizarse en aplicaciones de muy alta tasa de datos y baja latencia, como transmisión de video en tiempo real, comunicaciones inalámbricas dentro del tren y otros servicios avanzados para pasajeros. Una de las bandas candidatas es la 26 GHz [81], que, aunque todavía está en fase de pruebas, tiene un gran potencial para transformar la industria ferroviaria.

En cuanto a su uso en la actualidad, estas bandas de ondas milimétricas son viables para aplicaciones en entornos controlados como el metro y ferrocarriles urbanos, donde la cobertura es más accesible y los requisitos de penetración son menos estrictos. Sin embargo, su utilización en trenes de alta velocidad, como el AVE, presenta limitaciones debido a la cobertura y la propagación de la señal a lo largo de largas distancias. Por lo tanto, mientras que su uso en sistemas de metro y ferrocarriles urbanos es cada vez más común, su implementación en trenes de alta velocidad deberá superar retos técnicos importantes antes de convertirse en una opción viable.

En [82] se presenta un estudio sobre redes 5G que revela cómo las ondas milimétricas ofrecen una capacidad significativa gracias a su amplio ancho de banda, pero presentan desafíos debido a su limitada propagación en entornos densos. Los modelos de canal desarrollados concluyen que las pérdidas por obstáculos, como edificios y vegetación, pueden mitigarse mediante tecnologías como *beamforming* y antenas MIMO masivas. Además, estos estudios demuestran que las altas frecuencias son más sensibles a la alineación precisa entre transmisor y receptor, lo que refuerza la importancia de diseños cuidadosos en redes urbanas para maximizar la eficiencia espectral.

En el caso de estaciones ferroviarias, en [83] se presenta un estudio donde se muestra cómo las ondas milimétricas, específicamente en 41 GHz, son afectadas por reflexiones y dispersión

**Tabla 1.3:** Bandas de frecuencia NR 5G n100 y GSM-R

Banda	Rango de frecuencia (MHz)	Rango de frecuencia UL (MHz)	Rango de frecuencia DL (MHz)	Ancho de banda (MHz)	Modo de Duplicación
n100	1880 – 1920		1880 – 1920	40	TDD
GSM-R	876 - 880		921 – 925	5	TDD

causadas por trenes y estructuras metálicas. El estudio indica estrategias adaptativas de transmisión, como antenas direccionales y mapeo detallado del entorno, pueden mejorar la conectividad. Las mediciones también indican que las señales pueden mantenerse estables a distancias razonables cuando los sistemas consideran dinámicamente el movimiento y las barreras físicas características de estas áreas.

También hay publicaciones sobre cómo las ondas milimétricas interactúan en entornos ferroviarios urbanos y suburbanos. Evalúa la pérdida de trayecto, la dispersión temporal y el efecto Doppler en rutas rectas y curvas. En rutas curvas, se observó menor dispersión multitrayecto y un aumento en el factor  $K$  de Rician, indicando que las señales directas son dominantes. También se modeló el efecto Doppler, mostrando mayores desplazamientos a velocidades más altas [84].

Para trenes de alta velocidad se han realizado estudios en la banda de 60 GHz, explorando cómo las antenas direccionables impactan la propagación a altas velocidades [85]. Sus hallazgos destacan desafíos en la alineación del haz en trenes de alta velocidad y proponen soluciones de mitigación utilizando antenas inteligentes.

También analizan la atenuación de señales en función de las distancias Tx-Rx y los materiales de los vagones de propagación para túneles ferroviarios utilizando frecuencias entre 30 y 60 GHz [86], se investigan escenarios de túneles donde las reflexiones dominan la propagación. Este estudio incluye modelos que predicen el comportamiento de la señal considerando la geometría del túnel y los materiales de las paredes, lo cual es crucial para redes ferroviarias subterráneas de próxima generación donde se subraya la importancia de adaptar modelos de propagación a las particularidades del entorno ferroviario para mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas de alta frecuencia en trenes modernos.

Existen incluso estudios donde se desarrollan modelos avanzados para entender cómo factores atmosféricos como el vapor de agua, la lluvia y las nubes influyen en la propagación de ondas milimétricas, especialmente en frecuencias que van desde 30 GHz hasta 1000 GHz [87]. Los resultados son aplicables tanto en telecomunicaciones como en sistemas de detección atmosférica. Se analiza cómo las altas frecuencias enfrentan mayores pérdidas debido a la absorción molecular, y se sugieren estrategias de mitigación para enlaces de comunicación, como el uso de frecuencias redundantes y diseños robustos de antenas.

La combinación de estas bandas permite al 5G adaptar el uso de frecuencias a las necesidades del entorno ferroviario, optimizando tanto la cobertura como la capacidad para los distintos escenarios en los que operan las redes ferroviarias. Esto proporciona una infraestructura flexible y robusta que no solo soporta comunicaciones críticas y monitorización en tiempo real, sino también futuras aplicaciones avanzadas en el sector ferroviario, con una planificación que asegura evitar interferencias y permite una cobertura confiable en rutas largas y entornos variados.

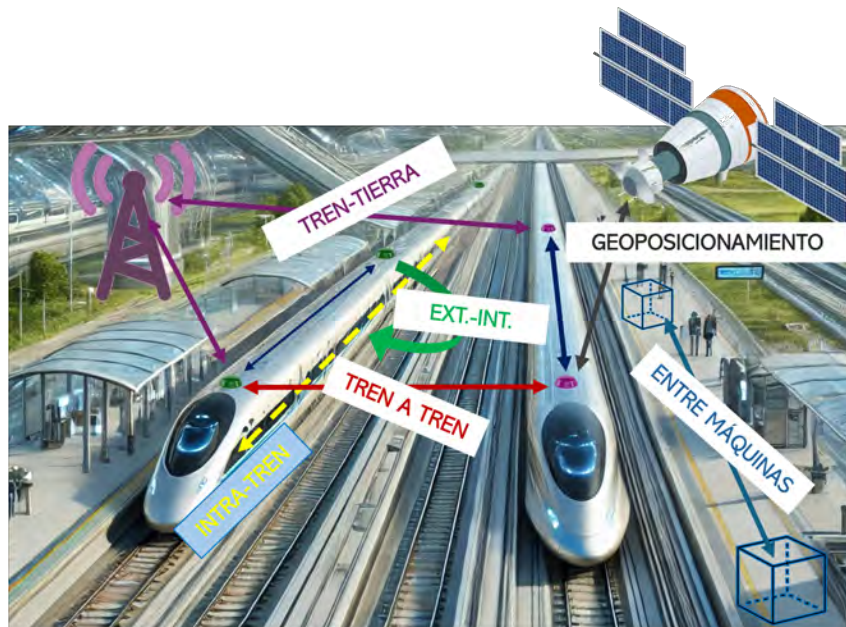
### 1.1.7 Enlaces de comunicaciones para el ferrocarril

Teniendo en cuenta estos elementos, el desarrollo de esta tesis incluye nuevos enlaces para conectar cualquier elemento ferroviario manteniendo la actual comunicación tren-tierra. Estos

enlaces se extienden a comunicaciones de tipo máquina (MTC) para elementos en tierra, tren a tren e incluso interior de tren o comunicaciones de geoposicionamiento. Sin embargo, esta evolución implica una serie de retos a superar en cuanto a criterios de implantación, estandarización, regulación del espectro y sistemas heredados.

Los enlaces estudiados dentro del contexto de esta tesis para el entorno ferroviario son los siguientes, también descritos en la Figura 1.9, entre los que se encuentran:

- Comunicaciones tren-tierra.
- Comunicaciones a bordo del tren.
- Comunicaciones tren-tren.
- Comunicaciones entre máquinas.
- Comunicaciones de geolocalización.



**Figura 1.9:** Representación gráfica de los enlaces objeto de estudio de esta tesis

### Comunicaciones tren-tierra

Las comunicaciones tren-tierra son el punto más complejo, debido a la alta fiabilidad y disponibilidad que exigen. De acuerdo con los requisitos definidos en diferentes pilotos de prueba y fuentes bibliográficas [88, 89], pueden definirse algunos requisitos generales para un sistema de comunicaciones para comunicaciones críticas (véase la Tabla 1.5).

Un sistema de comunicaciones tren-tierra requiere unas capacidades de proveer una alta capacidad en entornos de alta movilidad. En particular, este trabajo se centra en el entorno ferroviario donde se pretende proporcionar un servicio de banda ancha. Sus principales características son:

**Tabla 1.5:** Comunicaciones tren-tierra

<b>Tipo de comunicación</b>	<b>Crítico para aplicaciones de seguridad</b>	<b>Crítico para aplicaciones operativas</b>	<b>No crítico</b>
<b>Bandas de frecuencia</b>	800 – 6000 MHz	5, 27, 67 GHz	1-6 / 12-14 / 18 / 24 GHz
<b>Ancho de banda</b>	1 – 10 MHz	100 – 1000 MHz	100 – 500 MHz
<b>Tasas de datos</b>	<10 Mbps	1-10 Gbps	Terrestre Satélite
<b>Modulación</b>	OFDM – QPSK	QAM xx	Adaptativa
<b>Retardo</b>	<50 ms	<10 ms	<500 ms
<b>Movilidad</b>	500 km/h	Baja	500 km/h o Baja
<b>Disponibilidad</b>	>99,99 %	>98 %	>92 %

- En el interior de cada tren hay una alta densidad de personas.
- La velocidad de movimiento del vehículo puede llegar hasta 500 km/h.
- El tren se mueve por zonas poco pobladas donde hay un mínimo despliegue de sistemas inalámbricos o móviles.

La cobertura radioeléctrica continua a lo largo de las vías del tren es un requisito esencial para el despliegue de redes ferroviarias. Para ello, se ha de evitar la interrupción del servicio a los pasajeros. Sin embargo, las pérdidas adicionales causadas por la estructura de los vehículos [90] [91] tienen un gran impacto en el diseño de la red, disminuyendo en gran medida el alcance de la cobertura y, por tanto, aumentando la capa radio necesaria para proporcionar un servicio satisfactorio. Además, algunas características específicas de este tipo de escenarios son las altas pérdidas de penetración en vagones blindados, rápidas variaciones temporales en el canal de propagación radioeléctrica e interferencia entre portadoras debido al efecto de desplazamiento Doppler. Por último, otro gran inconveniente es la cantidad de procedimientos de traspaso que se producen simultáneamente, lo que provoca una sobrecarga de señalización.

Este tipo de enlaces ha sido ampliamente estudiado en las bandas de frecuencias UHF y microondas. También, este campo de estudio es de gran interés y las redes móviles tradicionales se pueden encontrar en la literatura vastos estudios como [92], el cual presenta modelos de pérdida de propagación a gran escala basados en datos empíricos para la planificación de redes celulares de 5G en el espectro de ondas milimétricas, basados en mediciones del mundo real a 28 GHz y 38 GHz en Nueva York y Austin, o [93] para el despliegue en interiores. También en el ámbito del ferrocarril como [94] a través de simulaciones y medidas de canal en distintas bandas relevantes para el ferrocarril [95],

## Comunicaciones a bordo del tren

Actualmente, en la mayoría de los sistemas de comunicación ferroviaria existentes, lo habitual es que los dispositivos móviles de los pasajeros reciban la señal de radio directamente de la RAN distante. Mientras que la señal de radio tiene que penetrar en la estructura del material rodante para llegar al lado del receptor dentro del tren. Por lo tanto, el sistema de comunicación convencional es difícil de proporcionar servicios de red satisfactorios para los viajeros a bordo del tren [3] [96] [97] .

Como se detallaba en la Sección 1.1.7, el puro despliegue de LTE/5G en escenarios ferroviarios representa un gran reto al tener que cumplir los niveles de calidad de servicio (QoS) requeridos para las comunicaciones de los usuarios a bordo de los trenes [98].

Para dar respuesta a esta problemática, se han estudiado extensivamente una alternativa tecnológica basada en *Mobile Relay Node* (MRN). El MRN actúa como una estación de retransmisión de señales dentro de un vehículo móvil. Este nodo tiene la capacidad de recibir señales inalámbricas desde estaciones base fijas y retransmitirlas a los dispositivos móviles de los usuarios que se encuentran dentro del vehículo. El MRN cuenta con una antena externa para recibir señales y una interna para distribuir las, funcionando como un intermediario entre la infraestructura de red externa (como estaciones base de telecomunicaciones) y los usuarios móviles [98] [99] [100].

Por otro lado, en la actualidad, existe un interés creciente por reducir los costes y el tiempo de mantenimiento de las comunicaciones ferroviarias. Las redes de comunicación por cable en el material rodante se estandarizaron para el TCMS a finales de los años noventa. Sin embargo, se ha pensado en los sistemas de comunicación inalámbricos para sustituir a sus homólogos cableados y reducir los costes y el tiempo de mantenimiento.

En este contexto donde se pretende evitar añadir cableado dentro del material rodante y carecemos de una suficiente calidad del servicio por parte de los transmisores terrestres, se propone un sistema capaz de transmitir la información desde una antena del exterior del tren al interior en movimiento.

Este tipo de enlaces, exterior-interior, pueden conectar dispositivos situados en el techo, bajo el bastidor o en el bogie con dispositivos instalados en el interior del tren [101] [102] y son utilizados para diversas aplicaciones, como la supervisión y el mantenimiento inalámbricos de los distintos elementos del exterior del tren [103] [104].

La particularidad de estos enlaces exterior-interior es que la señal electromagnética transmitida desde el techo o el bogie no llega directamente a los nodos interiores. En lugar de ello, se difracta alrededor de la carrocería del vagón o se refleja en el entorno circundante, y puede entrar en el vagón a través de las ventanillas. Esto significa que los enlaces exterior-interior son enlaces sin línea de visión directa (NLOS) dependiendo, por tanto, en gran medida de la estructura física del tren y sus materiales, así como del entorno exterior.

En la literatura se pueden encontrar varios trabajos que tratan de los enlaces dentro o alrededor de la carrocería del vagón del tren. En [105] [106] se miden enlaces de comunicación en el interior del vehículo a 2 GHz y 5 GHz, demostrando que la señal inalámbrica puede volver a entrar en el tren a través de las ventanas. En [107] se estudia la propagación de ondas

alrededor del tren para aplicaciones de redes inalámbricas de sensores para la monitorización del estado de los bogies a 434 MHz, mostrando un aumento de la pérdida de trayecto cuando las antenas están situadas bajo el tren.

### **Comunicaciones tren-tren**

Las comunicaciones de tren a tren (T2T) son importantes porque permiten transmitir información de seguridad directamente entre trenes adyacentes, eliminando la necesidad de pasar por infraestructuras en tierra, lo que reduce la latencia en los sistemas de control de trenes [108]. Este enfoque mejora la eficiencia y seguridad en los sistemas ferroviarios urbanos al permitir que cada tren gestione su propia comunicación y recursos sin depender de enlaces indirectos con estaciones de control en tierra. Esto simplifica la estructura del sistema y mejora el tiempo de respuesta.

La literatura muestra diversas técnicas de mejora de este tipo de comunicaciones a través de la capa de control o de recursos radio. Por ejemplo, las comunicaciones T2T utilizan redes oportunistas para aliviar la carga de las estaciones base al permitir la comunicación directa entre los terminales del tren. Estas redes contribuyen a la eficiencia del sistema en su conjunto dado que no sobrecargan la red móvil de tierra para este tipo de comunicaciones. Hay métodos de predicción como el sistema *Virtual Bank with Movement Prediction* (VBMP), que combinan la predicción de movimiento de nodos y una función para la selección de nodos de retransmisión y la gestión de enlaces topológicos dinámicos. Los resultados muestran una mejora en la descarga de datos y una reducción significativa en el tiempo de retraso promedio, especialmente con un mayor número de nodos [109].

Otro ejemplo es la técnica que utiliza el juego de Stackelberg para la asignación de recursos de comunicación radio para el sistema de control de trenes. Permite controlar la potencia y mejorar la eficiencia espectral [110]. El esquema aborda la interferencia entre las comunicaciones T2T y T2G, mejorando la estabilidad de la conexión, especialmente en los bordes de las celdas. Los resultados de simulación muestran que el esquema mejora el rendimiento general del sistema, asegurando la equidad y estabilidad en las conexiones T2T mientras se satisfacen los requisitos de QoS.

### **Comunicaciones entre máquinas**

En un contexto donde los sistemas de comunicación ferroviaria se preparan para un importante cambio de paradigma con la normalización FRMCS, se abre también un nuevo campo para la introducción de la digitalización en el campo de las comunicaciones entre máquinas. Las redes 5G como medio de comunicación para la interconexión de elementos ya son una realidad y hay múltiples aplicaciones dentro del mundo de IoT [111]. Además, dentro del ferrocarril existen estudios de sistemas para monitorización remota para trabajos de mantenimiento [112], entre otros.

Debido a que el aspecto de la disponibilidad es crítico para unas comunicaciones seguras, es necesario planificar el despliegue de las nuevas infraestructuras de comunicación. Sin embargo, son extremadamente costosas en términos de tiempo y costes dado que requieren una gran inversión por parte de los operadores y las empresas de infraestructuras, especialmente cuando

no hay infraestructura de obra civil implementada en la línea ferroviaria.

En la actualidad, los MNOs han comenzado a prestar servicios de conectividad a servicios críticos en otros sectores industriales [113]: cuerpos de emergencia, centrales nucleares, V2X o Industria 4.0 [114]. Sin embargo, en el sector ferroviario, el uso de los MNO solo se limita a la transmisión de datos no críticos (CCTV, recogida de registros del material rodante o servicios de información al pasajero).

## Comunicaciones de geoposicionamiento

El uso de GPS ya es conocido y extendido dentro de la industria del ferrocarril. Algunos ejemplos se pueden encontrar en las siguientes citas donde se hacen usos diversos de este tipo de tecnología de geoposicionamiento: un sistema inteligente de identificación de ubicación y alerta a pasajeros en los Ferrocarriles de India utilizando receptor GPS [115], un sistema de llamada y seguimiento automático adjunto al cuerpo de un elefante que monitoriza continuamente la posición del animal con respecto a los límites definidos por GPS establecidos alrededor de la vía del tren [116], o un sistema para la localización del material rodante dentro del modelo de red ferroviaria [117].

Además, la integración del GPS dentro de la tecnología 5G está transformando diversas industrias. Un ejemplo puede ser el de la agricultura [118] donde la sinergia entre 5G y GPS permite implementar sistemas de monitorización avanzada que recopilan datos sobre las condiciones de crecimiento y el ambiente de los cultivos, facilitando así decisiones informadas para los productores [119]. Otro ejemplo son los tractores autónomos, equipados con tecnologías 5G, pueden operar sin intervención humana, mientras que los robots automáticos para la pulverización de productos químicos aseguran una aplicación precisa al distinguir entre malezas y cultivos [120]. Además, técnicas como la siembra en bandas, que dependen del GPS, optimizan el uso de recursos al preservar la salud del suelo [121]. Esta convergencia tecnológica promete revolucionar la agricultura, haciéndola más sostenible y productiva [122].

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es investigar y proponer soluciones innovadoras en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas aplicadas al transporte ferroviario. A partir de un análisis detallado de las tecnologías existentes y las necesidades actuales del sector, se busca optimizar los sistemas de comunicación para mejorar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en la operación ferroviaria. Para ello, la investigación se centra en el diseño, implementación y validación de modelos y prototipos que aborden los retos de propagación de señales y coste de despliegue, integrando tecnologías emergentes como el 5G y teniendo en cuenta los retos descritos en el Estado del Arte (Sección 1.1).

Además, se plantea la transición hacia una infraestructura de telecomunicaciones más moderna que separa los enlaces de comunicaciones, evaluando su impacto en escenarios reales y su viabilidad técnica y económica en el contexto del sector ferroviario. Este objetivo se divide en los siguientes subobjetivos.

### **1.2.1 Objetivo 1. Comunicaciones Tren-Tierra con a través de ondas milimétricas**

En la literatura se encuentran algunos estudios en ondas milimétricas dentro del entorno de transporte, como se indicaba en la Sección 1.1.6. No obstante, la evaluación del canal de propagación es un requisito obligatorio para garantizar la fiabilidad de los enlaces de comunicación. Por este motivo, aunque ya existe cierta bibliografía sobre mediciones mmW en túneles en las bandas de 30 GHz, 60 GHz y 100 GHz [84] [85] [86], esta tesis propone un modelo de canal de propagación en un entorno ferroviario realista en ondas milimétricas para un entorno de ferrocarril metropolitano.

Este trabajo ha centrado su investigación en la propagación en la banda de frecuencias de 24 GHz en túneles ferroviarios metropolitanos realistas. Se ha aprovechado esta banda libre para poder hacer mediciones sin requerir una licencia. Para ello, se han aplicado tres métodos. En primer lugar, se ha descrito y puesto en práctica un modelo de propagación modal; a continuación, se ha empleado un simulador de trazado de rayos (RT) desarrollado especialmente para la propagación en túneles; y, por último, se han realizado medidas en un tren de pasajeros en un entorno de metro realista.

El objetivo de este estudio es presentar un modelo preciso de pérdidas de trayecto directamente aplicable a los túneles ferroviarios en la banda entre 24 y 30 GHz, y mostrar resultados significativos para simulaciones de banda ancha con el fin de evaluar la posibilidad de utilizar mmW para sistemas de comunicación en túneles ferroviarios metropolitanos. Como resultado, se espera obtener parámetros de pérdidas de trayecto, desvanecimiento teniendo en cuenta la polarización horizontal y vertical en las antenas receptoras y transmisoras.

### **1.2.2 Objetivo 2. Comunicaciones a bordo del tren y tren-tren**

En la Sección 1.1.7 detallan estudios de la literatura donde se tratan de los enlaces dentro o alrededor de la carrocería del vagón del tren y también cómo la señal puede entrar en el tren a través de las ventanas. No obstante, es necesario hacer una campaña de medidas exhaustiva para medir el rendimiento de los sistemas inalámbricos en estos entornos y conocer modelos realistas de canales inalámbricos. Las comunicaciones dentro de los vagones y las comunicaciones entre vagones requieren de la creación de modelos de canal inalámbrico para poder evaluar una posible solución inalámbrica que se utilice en TCMS.

El estudio tiene como objetivo dilucidar un modelo de propagación empírico obtenido a través de mediciones en el Metro de Madrid y enfocado en un enlace dentro del tren, de cara a un futuro TCMS inalámbrico. Las mediciones consideran varios escenarios ferroviarios, como túneles, estaciones de metro y zonas abiertas. Se propone la caracterización de distintos tipos de trenes, así como datos sobre el perfil de retardo de potencia, la dispersión del retardo y la pérdida de señal durante el trayecto.

Se plantea la caracterización de un enlace inalámbrico desde el techo de un tren hasta el interior a 2,6 GHz en los distintos escenarios propios de los entornos de metro: estación, en el túnel y en el exterior.

### 1.2.3 Objetivo 3. Comunicaciones entre trenes

En la Sección 1.1.7 se explican algunas técnicas de transmisión de señales entre trenes. No obstante, algunas consideraciones hay que tener en cuenta a la hora de hacer implementaciones de comunicaciones directas entre trenes, tales como las interferencias adicionales que se tendrán en este entorno.

Por ese motivo, el objetivo de este estudio es modelar la interferencia que producen las comunicaciones de un tren a otro cuando se encuentran circulando por las vías de manera habitual. Para ello, se propone la realización de medidas en un entorno real para calcular la señal que recibe un tren del otro, tanto en el exterior como en el interior de los trenes.

### 1.2.4 Objetivo 4. Comunicaciones entre máquinas

Existen amplios estudios de comunicaciones entre máquinas en la industria, incluida la del ferrocarril. Algunos de ellos se detallan en la Sección 1.1.7. Entre ellos, se demuestra cómo los MNOs pueden desempeñar un papel clave en la introducción del MTC para servicios críticos como los sistemas de señalización, la recogida de datos de grabación de audio o la telefonía operativa [123].

Esta solución alternativa es especialmente interesante para líneas de bajo tráfico ferroviario, mercancías, industria minera, dados los altos costes que el despliegue de fibra óptica privada requiere hoy en día [124].

Asimismo, actualmente en la red ferroviaria convencional de Adif existen hoy en día aproximadamente 3.000 km de líneas basadas en el sistema de señalización de Bloqueos Telefónicos, de las cuales Adif tiene previsto un plan de supresión de este tipo de sistemas [125] [126] por sistemas de señalización automáticos como los comentados en la Sección 1.1.3.

No obstante, la solución de señalización tipo para líneas donde no hay desplegada infraestructura de energía y/o comunicaciones supone unos altos costes de implementación, que solamente teniendo en cuenta el despliegue de la fibra óptica con la obra civil asociada puede hacer inviable económicamente la implantación de dicho sistema teniendo, además, en cuenta el bajo tráfico existente en dichas líneas [127] [128].

Uno de estos proyectos de supresión de Bloqueo Telefónico comprende una línea de unos doscientos kilómetros y trece estaciones [129], en los cuales se propone una solución para la supresión de bloqueos telefónicos a través de los siguientes sistemas: señalización, protección del tren, control de tráfico centralizado, fijas, VCA (videovigilancia, control de accesos y anti-intrusión), calefactores de agujas y su obra civil asociada, actuaciones ambientales, etc. El diseño resulta en un presupuesto global de aproximadamente 22 millones de euros [129] de los cuales la cantidad asociada al despliegue de fibra óptica y su correspondiente obra civil es de 8 millones de euros, lo que implica alrededor de un 40 % del coste total del proyecto.

En este trabajo tiene como objetivo evaluar la viabilidad de implementar redes públicas 4G/5G para la transmisión de datos críticos de señalización ferroviaria. Para ello, se propone llevar a cabo experimentos que permitan establecer una caracterización realista de los parámetros de comunicación para los sistemas de señalización ferroviaria cuando se introducen redes MNO.

### 1.2.5 Objetivo 5. Comunicaciones de geoposicionamiento

En este estudio se plantea el uso de GPS y otros sistemas de geoposicionamiento para hacer un uso en un sistema de billataje y su transmisión a través de redes móviles de operadores donde se muestran las capacidades de un sistema de este tipo haciendo uso de esta tecnología ya utilizada en otras industrias como describe la Sección 1.1.7 y en línea con algunos de los desafíos ferroviarios descritos en 1.1.1.

El objetivo es dilucidar la viabilidad de un sistema de canceladoras de billeteaje basado en localización GPS, uno de los servicios no-críticos descritos en la Sección 1. Para ello, se propone llevar a cabo varios tipos de medidas con diferentes equipos, para posteriormente ser comparadas entre sí. Se trata de mediciones puras de GPS con una antena situada en el interior de un tren simulando la posición de una de las canceladoras, otra antena situada en el techo exterior del tren y, por último, con un equipo de medida de cobertura móvil y GNSS que incluye los sistemas de localización GPS y GLONASS.

## 1.3 Metodología

El enfoque de esta investigación es experimental y se basa en modelos de propagación existentes, que han sido adaptados a las condiciones radioeléctricas del entorno ferroviario. Para ello, se han realizado mediciones en escenarios reales, permitiendo la validación y ajuste de dichos modelos con el objetivo de comprobar su aplicabilidad en el contexto ferroviario.

Para llevar a cabo las mediciones y validaciones, se han empleado equipos de propagación específicos, seleccionados en función de las bandas de frecuencia aplicadas a cada enlace. El detalle técnico de los dispositivos utilizados se describe en los correspondientes capítulos de esta tesis.

Además, en algunos casos se han empleado simuladores para validar experimentalmente los resultados obtenidos en las mediciones, asegurando la coherencia entre los datos empíricos y las predicciones teóricas.

### 1.3.1 Procedimiento metodológico

El desarrollo de la investigación se ha estructurado en las siguientes fases:

1. **Análisis de necesidades de comunicaciones:** Se identifican los requerimientos de comunicaciones en el entorno ferroviario teniendo en cuenta el servicio y enlace a cubrir.
2. **Selección de modelos de propagación:** Se estudian los modelos de propagación más adecuados para el enlace específico en el que se desea evaluar el uso de las comunicaciones.
3. **Selección de equipos de medición:** Se determinan los dispositivos necesarios para la realización de los experimentos y se construye, si es necesario, un prototipo adaptado a los objetivos de medición.
4. **Descripción del escenario de medidas:** Se define el entorno de mediciones, incluyendo aspectos como la geografía, enlace radioeléctrico de análisis y la infraestructura

ferroviaria.

5. **Realización de mediciones:** Se efectúan pruebas experimentales en diferentes las condiciones para evaluar el comportamiento de la propagación de la señal.
6. **Análisis y validación de resultados:** Se comparan los datos obtenidos con los modelos teóricos y, cuando es necesario, se emplean simulaciones adicionales para verificar la coherencia de los resultados.

### 1.3.2 Justificación de la metodología

El enfoque experimental utilizado en esta tesis permite obtener resultados específicos y ajustados a las condiciones reales del ferrocarril, lo que resulta fundamental para la aplicación práctica de las tecnologías de comunicaciones en este sector. La combinación de mediciones reales con la validación mediante modelos y simulaciones proporciona un análisis integral del fenómeno de propagación en el entorno ferroviario.

## 1.4 Estructura del documento

Este documento está organizado de la siguiente manera.

**El Capítulo 1 presenta el estado del arte de las tecnologías de comunicaciones para el ferrocarril**, aportando una descripción detallada de las principales tecnologías de comunicación utilizadas para cada uno de los diferentes enlaces de comunicación, incluyendo el contexto global y tecnológico de la industria, aportando una visión desde el desarrollo de las soluciones tecnológicas. Este capítulo **incluye también los objetivos** presentados en esta tesis de cara al desarrollo del cuerpo de este estudio.

**El Capítulo 3 presenta medidas de transmisión de datos en la banda de ondas milimétricas a 24 GHz dentro de túneles metropolitanos** para crear un modelo de canal útil para un posterior diseño de dichos sistemas. Se describe el comportamiento de la señal radioeléctrica mediante un modelo de pérdidas de camino, incluyendo desvanecimientos rápidos y lentos, y el efecto de guía-ondas en túneles arqueados. También se discuten los modelos de pérdidas utilizados, una técnica de predicción de propagación en 3D y los resultados experimentales obtenidos en el estudio.

**El Capítulo 4 analiza la separación del tráfico interior y exterior de los trenes para mejorar la calidad del canal de comunicación con señales de menor potencia. Se presenta un modelo de canal compuesto por un modelo empírico de pérdidas de camino y un modelo estadístico de desvanecimientos rápidos para analizar los enlaces a lo largo del interior del tren, enlace exterior-interior e interior-interior.** Las mediciones se realizaron en la banda de 2,6 GHz en entornos ferroviarios del Metro de Madrid, incluyendo túneles, estaciones y exteriores, con el fin de evaluar el rendimiento en diferentes escenarios de transmisión.

**El Capítulo 5 describe unas medidas realizadas entre trenes para medir la interferencia que se genera entre los trenes cuando circulan de manera normal por las**

**vías.** Se estudia cómo un tren recibe la señal de otro, tanto en su interior como en su exterior. Estos datos permiten evaluar el impacto de la interferencia en las comunicaciones T2T, lo que es clave para mejorar la eficiencia y fiabilidad de las conexiones en entornos ferroviarios.

**El Capítulo 6 estudia la viabilidad de implementar redes públicas 4G/5G para transmitir servicios críticos de señalización ferroviaria, como una alternativa más económica frente al despliegue de fibra óptica para la comunicación entre máquinas.**

Se basa en mediciones y simulaciones para caracterizar los parámetros de comunicación en sistemas de señalización ferroviaria. Se estudian tres escenarios: la interconexión entre un enclavamiento y un controlador de objetos, simulaciones de tráfico de señalización, y mediciones de campo en entornos ferroviarios reales, con el fin de definir KPIs de servicio, red y radio.

**El Capítulo 7 presenta los resultados de una campaña de mediciones de cobertura GPS a lo largo de líneas ferroviarias, con el objetivo de evaluar la viabilidad de un sistema de cancelación de billetes basado en GPS.** Se realizaron mediciones con diferentes equipos, incluyendo antenas dentro y fuera del tren, así como sistemas GPS y GLONASS. El enfoque principal es garantizar la disponibilidad del sistema para identificar correctamente la zona tarifaria en la que se encuentra el pasajero, sin requerir una precisión extrema.

Finalmente, **el Capítulo 8 aborda las conclusiones sobre la evaluación de diferentes tecnologías de comunicación y posicionamiento utilizadas en entornos ferroviarios.** Se exploran las comunicaciones en banda milimétrica para mejorar la transmisión en túneles, el uso de redes públicas 4G/5G para señalización ferroviaria, y la caracterización de enlaces inalámbricos en el metro. Además, se concluye sobre el estudio realizado sobre las interferencias producidas en las comunicaciones tren a tren, junto con la viabilidad del uso de GPS en sistemas de cancelación de billetes. En resumen, el capítulo examina cómo estas tecnologías pueden mejorar la eficiencia y fiabilidad en entornos ferroviarios metropolitanos, expresando sus posibilidades y también sus limitaciones.

# Capítulo 2

## Modelos de propagación y fundamentos de la comunicaciones inalámbricas

Este capítulo aborda los principios esenciales que rigen la propagación de señales en entornos ferroviarios, centrándose en tecnologías avanzadas como las bandas milimétricas y las comunicaciones GNSS. Se analizan los modelos de propagación adaptados a los distintos entornos descritos en esta tesis y específicos del sector ferroviario, como la propagación en túneles y el impacto en zonas de baja densidad de población. Además, se explora cómo los sistemas GNSS complementan estas tecnologías, proporcionando soluciones precisas y fiables para aplicaciones críticas en el transporte ferroviario.

### 2.1 Modelos de propagación de banda estrecha

Esta sección aborda los fundamentos para describir cómo se propagan las ondas de radio en entornos donde se emplea espectro de banda estrecha. Estos modelos son esenciales para caracterizar el comportamiento de las señales en escenarios de comunicaciones como interiores, áreas urbanas y rurales. Se analizan los factores que influyen en la atenuación, dispersión y difracción de las señales, proporcionando un marco que permita a los diseñadores de redes predecir la calidad y cobertura del enlace, optimizando el uso del espectro disponible.

#### 2.1.1 Modelo de pérdidas del camino

Los canales inalámbricos pueden verse afectados de forma muy diferente según el entorno y las condiciones de propagación. A diferencia de los canales por cable, que son estacionarios y predecibles, la naturaleza de los canales de radio es extremadamente aleatoria. La señal transmitida puede cambiar en su recepción en función de muchos factores diferentes [130]. Estos pueden resumirse en los siguientes: si se dan las condiciones de línea de visión o, por el contrario, si hay obstrucción de la señal causada por edificios, montañas, follaje de los árboles u otros obstáculos; la velocidad del transmisor y del receptor; si el entorno es exterior, interior

o algo intermedio como túneles [131]. Este conjunto de efectos, denominados multitrayecto, dificulta especialmente el análisis de la propagación.

Para comprender mejor cómo interactúa la señal con el entorno, a continuación se enumeran varios mecanismos de propagación [132]. Estos son **la penetración de la señal en los objetos, la reflexión, la refracción, la dispersión, así como el cambio de medio, la atenuación por los gases atmosféricos y diferentes fenómenos meteorológicos**. El impacto sobre la onda electromagnética es diferente según la frecuencia, el entorno e incluso, en el mismo entorno, existe una dependencia de las condiciones de la línea de visión.

Como se ha mencionado anteriormente, hay varias razones por las que se produce el multitrayecto [133]. Entre ellas, **la reflexión** es la más destacada, la cual se produce cuando la onda choca con una superficie grande en comparación con la longitud de onda de la señal. La cantidad de energía que se reflejará depende de las propiedades del material, del ángulo de llegada y de la polarización. Esto se describe mediante los coeficientes de reflexión de Fresnel [134]. Además, es importante tener en cuenta que la rugosidad de la superficie impacta más cuando la frecuencia es mayor.

Al igual que la reflexión, la dispersión depende de la longitud de onda. Se produce cuando la forma del objeto tiene una longitud menor que la longitud de onda de la señal. El resultado es una reflexión en varias direcciones que dificulta el análisis. Además, cuando hay demasiados obstáculos, como las hojas de un árbol, el análisis determinista no es especialmente eficaz. En la mayoría de los estudios, la dispersión no se suele considerar dado que suele ser despreciable.

El último efecto es **la difracción**, producida por las irregularidades agudas de las superficies, como esquinas y bordes más largos que la longitud de onda. El campo difractado a lo largo de estas irregularidades afecta directamente a la potencia total recibida, por lo que es fundamental tenerlo en cuenta en los escenarios de propagación en exteriores.

El resultado de estos efectos en el campo electromagnético se describe del siguiente modo para señales de banda estrecha [135]:

$$E_{Rx}(d) = \sum_i (E_i(d)) \quad (2.1)$$

donde  $E_i$  es el campo eléctrico de la  $i$ -ésima componente multitrayecto, que puede definirse como [131]:

$$E_i(d) = E_0 \rho_{ti} \rho_{ri} L_i(d) \prod_j \Gamma(\phi_{ji}) \prod_p T(\phi_{pi}) e^{-jkd} \quad (2.2)$$

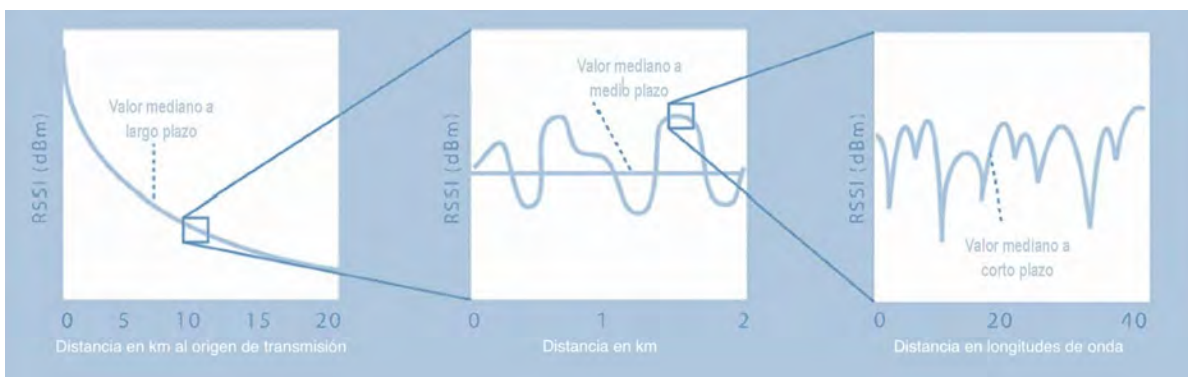
$E_0$  es la amplitud del campo reflectado en V/m;  $\rho_{ti}$  y  $\rho_{ri}$  son los diagramas de radiación de las antenas receptora y transmisora respectivamente en las direcciones de la  $i$ -ésima componente multitrayecto;  $L_i(d)$  son las pérdidas de trayecto para la  $i$ -ésima componente;  $T(\phi_{pi})$  es el coeficiente de transmisión para la  $p$ -ésima transmisión de la  $i$ -ésima componente multitrayecto;  $e^{-jkd}$  es el factor de fase de la propagación debido a la longitud del trayecto a una distancia  $d$  y  $k = 2\pi/\lambda$  donde  $\lambda$  es la longitud de onda.

Sin embargo, la señal recibida no se describe totalmente como queda descrita en la Ecuación (2.2) ya que la señal también se modifica en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

En cualquier caso, **la complejidad de los mecanismos de propagación hace demasiado difícil el análisis para este tipo de entornos de forma determinista. Por ello, para diseñar un sistema y predecir su rendimiento, es necesario modelar y caracterizar el canal de propagación de forma empírica y estadística.**

Los modelos de propagación suelen centrarse en la intensidad media de la señal recibida a una distancia determinada del transmisor al receptor. Esto resulta útil para estimar el área de cobertura radioeléctrica. Sin embargo, en las señales de banda estrecha hay fluctuaciones rápidas de la señal que también hay que caracterizar para entender mejor el comportamiento completo de la onda electromagnética. Por ello, el análisis de banda estrecha estudia la variación en diferentes escalas espaciales [136], como muestra la Figura 2.1:

- **La pérdida del trayecto** representa la reducción de la densidad de potencia o atenuación de una onda electromagnética a medida que se propaga por el espacio. Depende de la distancia entre el emisor y el receptor. Este efecto suele describirse de forma determinista.
- **El desvanecimientos lentos** representa las fluctuaciones que se producen a una escala de cientos de longitudes de onda. Se obtiene promediando unas diez longitudes de onda. La razón de estas variaciones es el *shadowing* por objetos grandes. Este efecto suele describirse de forma estadística.
- **Desvanecimientos rápidos** representa las fluctuaciones comparables a una longitud de onda. La razón de estas fluctuaciones es la interferencia entre diferentes componentes multitrayecto. Estas fluctuaciones en la intensidad de campo, también llamadas *fast-fading*, pueden describirse estadísticamente.



**Figura 2.1:** Representación gráfica del comportamiento de las señales en su análisis de banda estrecha [137]

### 2.1.2 Modelo de pérdidas del camino en espacio libre

El modelo de pérdidas del camino en espacio libre (FSPL, *Free Space Path Loss*) representa cómo disminuye la potencia de la señal cuando viaja por un medio sin obstáculos que provoquen

reflexión o difracción. Depende de la frecuencia y de la distancia respecto al emisor. Podemos considerar condiciones de espacio libre cuando la primera zona de Fresnel está sustancialmente libre de obstáculos (puede especificarse como una separación de 60 %) [135]. La expresión matemática es la siguiente:

$$FSPL = 32,4 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (2.3)$$

donde  $f$  es la frecuencia en MHz y  $d$  es la distancia medida en km.

### 2.1.3 Pérdidas del camino en *shadowing*

El modelo de pérdidas del camino en espacio libre sólo representa la atenuación media cuando existe un trayecto directo, despejado y sin obstáculos entre el transmisor y el receptor [138]. Sin embargo, esta no es siempre la situación y la atenuación resultante se ve afectada por un entorno más complejo en el que podemos encontrar obstrucciones a lo largo de la distancia.

Por lo tanto, la Ecuación (2.4) presenta una extensión genérica del FSPL que describe la atenuación sufrida por una señal. Los principales parámetros se derivan de las siguientes mediciones realizadas en un entorno real.

$$A(d) = A(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma \quad (2.4)$$

donde  $A(d_0)$  es la atenuación en una distancia de referencia  $d_0$ ;  $n$  representa el exponente de pérdida, y  $\chi_\sigma$  denota la gran variable aleatoria de media cero y desviación típica  $\sigma$  que suele seguir una gaussiana, reflejando la atenuación (en dB) causada por el desvanecimiento a gran escala.

En teoría de la probabilidad, la distribución normal (o gaussiana o de Gauss o de Laplace-Gauss) es una distribución de probabilidad continua muy común, como demuestra Egli en [139]. La densidad de probabilidad de la distribución normal es:

$$f(x|\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.5)$$

donde  $\mu$  es la media o expectativa de la distribución (también su mediana y moda);  $\sigma$  es la desviación estándar en dB, y  $\sigma^2$  es la varianza.

### 2.1.4 Balance de enlace

El balance de enlace es una descripción de todas las ganancias y pérdidas de un transmisor y receptor. Es una herramienta práctica para comparar niveles de potencia entre distintas tecnologías y sistemas. Proporciona una cuantificación del rendimiento mediante los siguientes parámetros [131]:

- Potencia Isotrópica Efectiva Radiada (PIRE). Es la potencia radiada relativa a una antena isotrópica. Se compone de la potencia real transmitida más la ganancia de la antena en dBi restando las pérdidas.
- Relación señal/ruido (SNR, de sus siglas en inglés *Signal to noise ratio*). Determina la probabilidad cierta de error dada una modulación de señal en el receptor.
- Sensibilidad. Indica la potencia mínima que el receptor es capaz de distinguir. Suele limitar el margen del enlace.
- Máxima pérdida de trayecto. Proporciona un valor independiente de la tecnología para estimar cobertura, capacidad, etcétera.

## 2.2 Modelos estocásticos de pequeña escala

Los modelos estocásticos a pequeña escala son una caracterización del desvanecimiento multitrayecto que son el resultado de la combinación de señales multitrayecto que llegan desde diferentes direcciones, con diferentes amplitudes y fases.

### 2.2.1 Distribución de Rayleigh

La distribución de Rayleigh describe un entorno multitrayecto cuando existen condiciones sin línea de vista caracterizada por la Ecuación 2.6. Se utiliza para analizar la propagación variable en el tiempo. Su función de densidad de probabilidad es la siguiente:

$$P_r(r, \phi) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, r \in [0, \infty], \phi \in [-\pi, \pi] \quad (2.6)$$

donde  $r$  es una variable aleatoria;  $\sigma$  es la desviación típica.

### 2.2.2 Distribución de Rician

Algunos escenarios presentan una componente dominante cuando existen condiciones de cuasi línea de visión [140]. La función de densidad de probabilidad (PDF, de sus siglas en inglés *Power Density Function*) está representada por caracterizada por la Ecuación 2.7.

$$P_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad (2.7)$$

donde  $r$  es una variable aleatoria;  $\sigma$  es la desviación estándar; el factor  $K$ , representado en (2.8), es la relación entre el componente LoS,  $A$ , y el componente multitrayectoria;  $I_0(z)$  es la función de Bessel modificada de orden 0-ésimo de primer tipo.

$$K = 10 \log\left(\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.8)$$

Al disminuir la amplitud de la trayectoria dominante, la distribución de Rician degenera en una distribución de Rayleigh.

### 2.2.3 Otras distribuciones estadísticas

Hay otras funciones estadísticas utilizadas en la literatura para caracterizar los desvanecimientos rápidos como Nakagami y Weibull.

#### Distribución de Nakagami

La distribución de Nakagami [141] se ajusta mejor a los datos empíricos, ya que presenta una distribución de desvanecimiento más general al no suponer una condición de trayectoria directa. La PDF se representa como sigue:

$$P(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{2\rho^2}\right)^m r^{2m-1} e^{-\frac{mr^2}{2\rho^2}}, r \geq 0; m \geq 0,5 \quad (2.9)$$

donde  $\rho^2$  es el valor medio cuadrático de la variable aleatoria;  $\Gamma$  es la función Gamma;  $m$  es el factor de forma o figura de desvanecimiento, que describe el grado de desvanecimiento del canal de desvanecimiento multitrayecto:

$$m = \frac{E^2[r^2]}{Var[r^2]} \quad (2.10)$$

En el caso de que  $m$  sea 0,5, la distribución PDF se reduce a una distribución gaussiana unilateral; cuando  $m$  es igual a 1, se obtiene el canal de Rayleigh.

#### Distribución de Weibull

La distribución de Weibull [142] representa otra distribución general de desvanecimiento, que también incluye a Rayleigh como caso especial. Es una de las más utilizadas en ingeniería de fiabilidad y análisis de datos de fallos. La PDF se expresa de la siguiente manera:

$$P(r) = \frac{\beta}{2\rho^2} r^{\beta-1} e^{-\frac{r^\beta}{2\rho^2}}, r \geq 0 \quad (2.11)$$

donde  $\rho = E[r^2]/2$ ;  $\beta$  determina la gravedad del desvanecimiento. Cuando  $\beta = 2$ , la distribución de Weibull se degrada a distribución de Rayleigh; para  $\beta < 2$ , el desvanecimiento es más grave que el de Rayleigh.

## 2.3 Propagación de ondas en túneles

Los túneles son uno de los escenarios de propagación más típicos y característicos de los sistemas de transporte. Además, presentan unas características de propagación especiales, ya

que siguen el efecto de guía de ondas, que, según la teoría, debería presentar un exponente de pérdida de camino menor que la propagación en espacio libre.

El análisis modal es una técnica clásica para estudiar el canal de propagación en túneles en los que existe efecto de guía de ondas. Se basa en el concepto de que la atenuación de la señal en este tipo de escenarios depende de los modos electromagnéticos que se propagan dentro del túnel. Como el área de la sección transversal del túnel es bastante grande en comparación con la longitud de onda de la señal, hay muchos modos propagándose por este canal. Sin embargo, los modos sufren una extinción gradual a medida que viajan por el entorno hasta el punto de ruptura,  $Z_{NF}$ , donde los modos se atenúan lo suficiente y se puede considerar que sólo se propaga el primer modo [143].

$$Z_{NF} \approx \text{Max} \left( \frac{a^2}{\lambda}, \frac{b^2}{\lambda} \right) \quad (2.12)$$

donde  $a$  y  $b$  son la dimensión horizontal y vertical del túnel, respectivamente, y  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal.

Estas dos regiones se definen como región de campo cercano y región de campo lejano. Por un lado, la región de campo cercano representa la zona en la que la amplitud de campo sufre un fuerte desvanecimiento y pérdidas rápidas obtenidas a partir de la contribución de muchos rayos que se propagan desde diferentes ángulos con altas pérdidas. Por otro lado, la región de campo lejano es donde la relación entre el primer modo y el resto es lo suficientemente alta como para despreciar el efecto de los otros modos.

Como [143] explica en detalle, la energía contenida en la señal transmitida que se propaga a través del túnel se divide en varios modos. Cada uno de ellos se atenúa siguiendo un decaimiento diferente. La pérdida global del trayecto puede simplificarse considerando que cada modo tiene una potencia independiente de los demás. Por lo tanto, la potencia total recibida es aproximadamente la suma de la potencia de cada modo. Esta suposición se basa en el hecho de que los modos son ortogonales.

Asumiendo esta situación, la expresión de pérdida de cada modo puede aproximarse para polarización horizontal y vertical,  $\alpha(m, n)^{h,v}$  considerando el túnel como una guía de onda rectangular.

$$\alpha(m, n)^v = 4,343\lambda^2 \left( \frac{m^2}{a^3\sqrt{\varepsilon_{r1}} - 1} + \frac{n^2\varepsilon_{r2}}{b^3\sqrt{\varepsilon_{r2}} - 1} \right) \quad (2.13)$$

$$\alpha(m, n)^h = 4,343\lambda^2 \left( \frac{m^2\varepsilon_{r1}}{a^3\sqrt{\varepsilon_{r1}} - 1} + \frac{n^2}{b^3\sqrt{\varepsilon_{r2}} - 1} \right) \quad (2.14)$$

donde  $\alpha(m, n)^{v,h}$  es la atenuación de cada modo en dB/km en polarización vertical ( $v$ ) y horizontal ( $h$ ) para el modo  $m, n$ -ésimo;  $\varepsilon_{r1, r2}$  es la permitividad relativa de las paredes vertical y horizontal respectivamente. Este modelo también puede aplicarse a túneles arqueados ajustando las dimensiones de la sección transversal [144].

Como muestran la Ecuación (2.13) y la Ecuación (2.14), las dimensiones de los túneles están directamente relacionadas con la atenuación que sufre cada modo. Así, cuanto mayor es la sección transversal del túnel, menor es la atenuación que experimentan los modos. Esto se debe a que las pérdidas son inversamente proporcionales al cubo de la altura y anchura de los túneles.

Con esta constante de propagación, la atenuación global para ambas polarizaciones,  $L_{mn}^{\nu,h}$ , a una cierta distancia, ( $z$ ), considerando las pérdidas como la contribución eficaz de los modos para ambas polarizaciones, se puede expresar de la siguiente manera:

$$L_{mn}^{\nu}(z) = 10 \log_{10} \left[ \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^N 10^{\frac{10 \log_{10}(z) + \alpha(m,n)^{\nu}}{10}} \right] \quad (2.15)$$

$$L_{mn}^h(z) = 10 \log_{10} \left[ \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^N 10^{\frac{10 \log_{10}(z) + \alpha(m,n)^h}{10}} \right] \quad (2.16)$$

donde  $M$  y  $N$  son los últimos modos tenidos en cuenta.

Además, las pérdidas son directamente proporcionales al cuadrado del orden de los modos, de modo que los modos más altos experimentan una atenuación más fuerte. De hecho, podemos considerar que a partir de cierta distancia, todos los modos de alto orden se han extinguido y sólo quedan los fundamentales.

Sin embargo, el modelo de propagación modal no tiene en cuenta las pérdidas por inclinación, que son más importantes en los túneles semicirculares y deben ajustarse cuidadosamente para cada túnel; tampoco tiene en cuenta la rugosidad de las paredes de los túneles, que puede producir dispersión de la señal. Por eso se realizan simulaciones con la técnica *Ray Tracing* (RT) para obtener resultados más precisos.

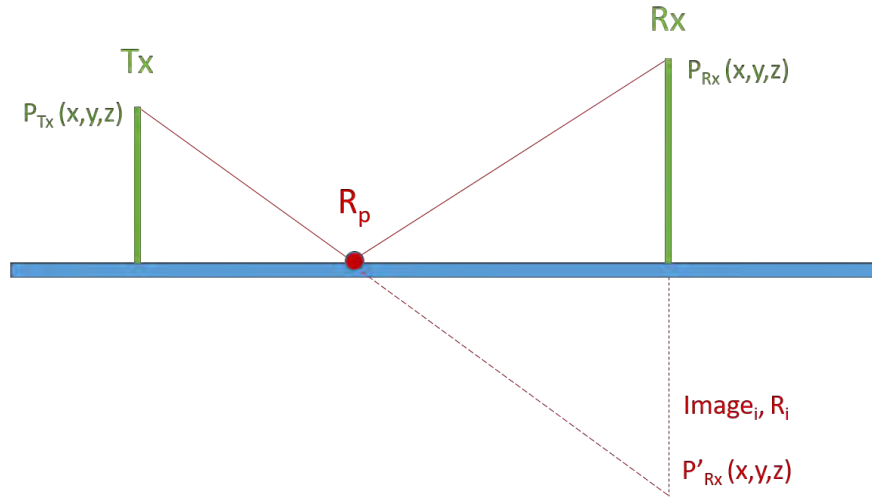
## 2.4 Técnica de trazado de rayos en 3D

El trazado de rayos 3D o RT es una técnica basada en un método de óptica geométrica para calcular el canal de propagación del entorno modelado. Se trata de una herramienta de predicción de la propagación precisa y versátil para diferentes tipos de escenarios. Utiliza un modelo de canal determinista que requiere un conocimiento exacto de la descripción geométrica y electromagnética del entorno. Por ello, la precisión de RT conlleva una elevada complejidad computacional, que escala directamente con el número de trayectorias de propagación consideradas. Sin embargo, presenta grandes ventajas ya que, por un lado, permite modelar con gran detalle los escenarios representados; y, por el otro lado, es posible calcular información de banda ancha como la probabilidad de Densidad de Potencia (PDP, de sus siglas en inglés *Power Density Probability*) o el Ángulo de Llegada (AoA, de sus siglas en inglés *Angle of Arrival*) de los rayos.

Los objetos se modelan como una malla sólida triangular formada por distintos materiales cuyas propiedades dieléctricas se definen en función de la frecuencia portadora. Al tratarse de un RT tridimensional, se tienen en cuenta las reflexiones en el techo y el suelo. De este

modo se obtienen resultados de predicción más precisos que con los modelos bidimensionales convencionales [145].

Mediante el método de las imágenes, se calculan las reflexiones para obtener las trayectorias de propagación [146]. Este método consiste básicamente en convertir un campo eléctrico en otro equivalente más fácil de calcular. En ciertos casos, es posible sustituir un conductor por una o varias cargas puntuales. Así, las superficies conductoras se sustituyen por superficies equipotenciales con potenciales equivalentes.



**Figura 2.2:** El método de la imagen.  $R_i$  con respecto al plano de tierra

Como muestra la Figura 2.2, teniendo la ubicación de Tx y Rx, el punto de reflexión,  $R_p$ , coincide con la intersección entre el obstáculo y el segmento que une la Tx con la imagen del receptor,  $R_i$ . Por lo tanto, el rayo sigue una línea recta desde Tx hasta  $R_p$  y, a continuación, otra línea recta desde  $R_p$  hasta Rx. Es posible ampliar este método para obtener las trayectorias con reflexiones múltiples. Finalmente, la señal recibida,  $E_r$ , es la suma de todos los rayos llegados a Rx, como describen la Ecuación (2.17) y la Ecuación (2.18).

$$E_r = \left| \sum_i E_i(d = d_i) \right| \quad (2.17)$$

y

$$E_i(d) = E_0 \rho_{tx} \rho_{rx} L_i(d) \prod_p^N [\Gamma(\phi_{pi}) T(\phi_{pi})] e^{-j2\pi d/\lambda} \quad (2.18)$$

donde  $E_i$  es el campo eléctrico del rayo  $i$ -ésimo;  $E_0$  es la amplitud del campo electromagnético;  $\rho_{tx}$  y  $\rho_{rx}$  son el diagrama de radiación de la antena transmisora y receptora, respectivamente;  $L_i$  son las pérdidas de trayectoria de la componente  $i$ -ésima del rayo a una distancia  $d$ ;  $\Gamma(\phi_{ji})$  y  $T(\phi_{pi})$  son el coeficiente de reflexión y transmisión de la  $p$ -ésima reflexión de la componente  $i$ -ésima, respectivamente;  $N$  es el máximo de reflexiones consideradas; y  $e^{-j2\pi d/\lambda}$  es el factor de fase debido a la distancia recorrida.

## 2.5 Conceptos relevantes de la aplicación de los sistemas GNSS al transporte ferroviario

El uso de GNSS supone para el sector ferroviario retos transversales y otros de índole técnica. Las aplicaciones relacionadas con la protección, la ciberseguridad, la normativa legislativa y reglamentaria, la estandarización o la agilidad en los procesos de implementación, corresponden al primer grupo. Con el segundo están relacionadas aquellas otras tales como el tratamiento de las interferencias, el efecto multipath, la integridad de la señal de satélite, la resolución de las zonas 'oscuras' para la comunicación, como los túneles y las montañas, las líneas de alta complejidad, con bifurcaciones y cruces, o la precisión en el reconocimiento de líneas paralelas y estaciones.

La satisfactoria recepción de señales satelitales depende de unos factores distintos a los conocidos en otro tipo de sistemas de telecomunicaciones. En este caso, además de tener en cuenta la intensidad de señal recibida y la relación señal/ruido, SNR, se mide la posición relativa de los satélites en el cielo con respecto al receptor. Para hacer la medición correcta de estos parámetros se ha de considerar cada uno de los satélites desde el que se recibe señal.

Dado que un análisis de cada uno de estos aspectos por separado dificulta el análisis del sistema en su conjunto, hay indicadores que permiten identificar la calidad de recepción, además de parámetros definidos especialmente para este fin.

### 2.5.1 Número de satélites

El número de satélites desde los cuales el receptor recibe señal GPS es uno de los factores determinantes a la hora de estimar la posición GPS. Este parámetro da un resultado más o menos preciso en función del número de satélites que reciba en una misma localización. Esto es, cuanto más satélites sean visibles en un mismo punto, más exacta será la coordenada que estemos obteniendo.

De manera general, los satélites necesitan al menos cuatro (4) satélites para poder establecer la posición de un elemento; sin embargo, con tres (3) satélites es posible realizar una aproximación de la posición mediante la suposición de éste a un nivel medio del mar.

Las soluciones propuestas se basan en la utilización de otros sensores como cámaras, sensores LIDAR o unidades inerciales junto con tecnologías de inteligencia artificial para mejorar el posicionamiento proporcionado por GNSS en las zonas 'oscuras'. Los sensores inerciales son utilizados para detectar las fuerzas que actúan sobre el tren, lo que permite estimar su desplazamiento en el tiempo, y los sensores ópticos (cámaras y LIDAR), combinados con sistemas de inteligencia artificial, permiten calcular la posición del tren en relación a elementos clave situados en la vía, permitiendo posicionamientos centimétricos en condiciones óptimas.

## 2.5.2 Efectos de la propagación

### Estructura del tren

En las líneas objeto de estudio circulan diferentes series de tren cuya composición y estructura tanto interna como externa son diferentes y, por tanto, los efectos de propagación son diferentes. Este factor se ha tenido en cuenta a la hora de realizar las medidas en cada una de las líneas. Para ello se han analizado varias series a lo largo de una misma línea.

Por un lado, la manera en que la estructura interna afecta a la recepción de la señal es debido al apantallamiento de la estructura. Las barras metálicas y la posición de los asientos también distorsionan la señal dado que introducen fenómenos dispersivos sobre esta, produciendo así efectos de multitrayecto.

Además, la cantidad de ventanas y su posición relativa con respecto a los satélites y a los receptores permiten la penetración de la señal en el interior del tren y, a su vez, la ausencia de éstas crea zonas de sombra en azimut y elevación. Este aspecto tiene efecto sobre las antenas ubicadas en el interior del tren.

Por otro lado, para las antenas ubicadas en el exterior, la estructura del techo refleja y difracta la señal radioeléctrica de la misma manera que lo hace en el interior. Además, como sucedía en las antenas interiores, los distintos elementos situados en el techo, dependiendo de su altura y, en general, posición relativa entre satélites y receptor, pueden crear zonas de sombra en azimut y elevación.

Finalmente, el movimiento del tren y de los satélites origina el efecto *Doppler*, el cual genera un cambio en la longitud de onda de la señal transmitida.

### Orografía, perfil de elevación y vegetación

La geografía objeto de estudio se caracteriza por tener zonas montañosas en el interior y escarpados acantilados costeros. Este entorno complica particularmente una implementación de este tipo de sistemas, dadas las zonas de sombra que producen las montañas y las trincheras por las que transcurren estas líneas ferroviarias.

La vegetación del terreno también degrada la recepción de la señal dado que son zonas muy pobladas de árboles de elevada altura. Esto produce una atenuación adicional en la señal recibida y afecta al nivel de apantallamiento de la señal captada por los distintos dispositivos de medida.

### Túneles

Los sistemas de posicionamiento GNSS requieren de una visión directa con el receptor. Es por esto por lo que, en las zonas de túneles, no será posible obtener una correcta posición satelital. No obstante, con excepción del soterramiento de la estación de Oviedo, en el entorno de FEVE en Asturias no se encuentran largos túneles que dificulten la implementación de este sistema.



# Capítulo 3

## Modelado y caracterización de la propagación en túneles a frecuencias milimétricas

En este capítulo, se describen las medidas realizadas en la banda de ondas milimétricas para la transmisión de datos de banda ancha dentro de túneles metropolitanos. Estas medidas sirven para crear un modelo de canal útil a la hora de implementar un sistema de este tipo en entornos similares al de medida.

El capítulo explica el comportamiento de las señales radioeléctricas desde el punto de vista del modelo de pérdidas del camino con sus correspondientes desvanecimientos rápidos y lentos, así como del efecto de guía-ondas que se produce en un túnel arqueado a bandas de frecuencias de ondas milimétricas.

Para ello, se enuncian una técnica de predicción de propagación de trazado de rayos en 3D y se muestran las medidas realizadas y los resultados obtenidos en este estudio.

### 3.1 Mediciones en onda milimétricas para la modelización de un túnel de ferrocarril metropolitano

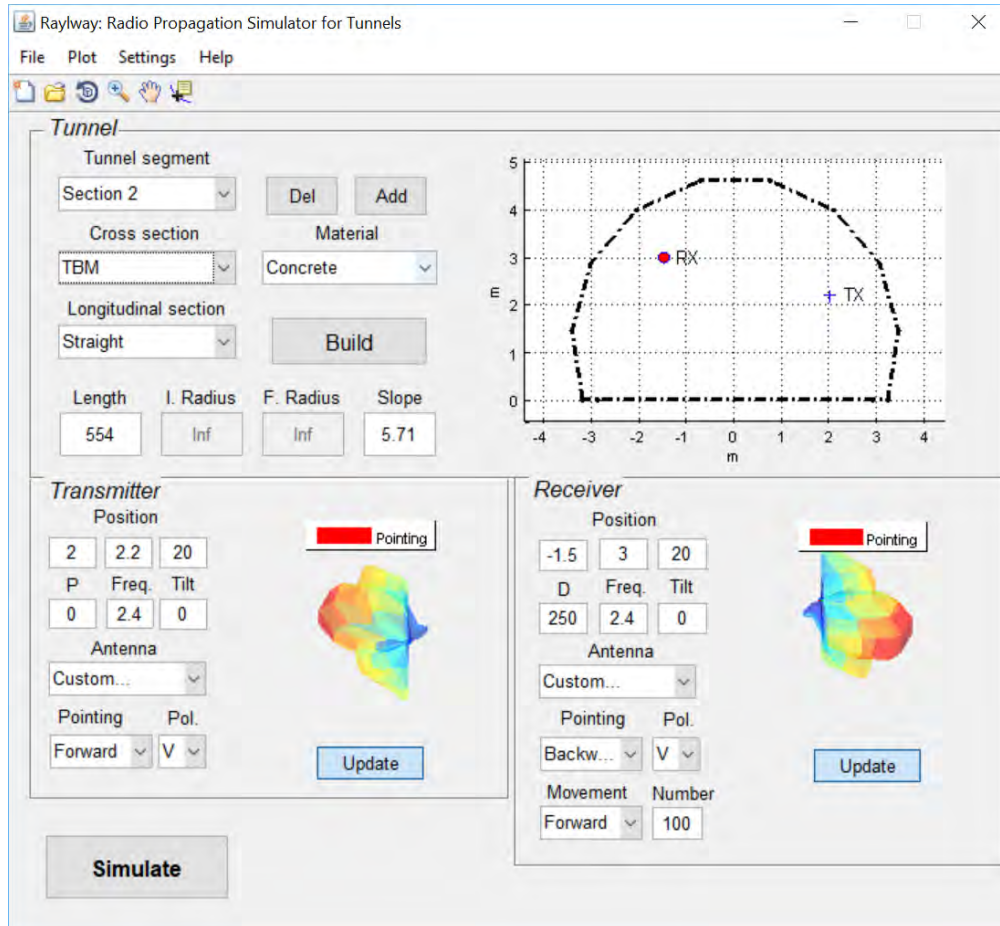
A continuación se detallan las herramientas de simulación y los escenarios de medidas llevados a cabo para este experimento.

#### 3.1.1 Herramienta de simulación y configuración de medidas

Las simulaciones se realizan utilizando la herramienta *Raylway radio propagation simulation for tunnels* desarrollada por el GRC de la Universidad Politécnica de Madrid. Su interfaz de usuario se presenta en la Figura 3.1 donde se muestran los parámetros establecidos, en este caso, para la polarización vertical; aunque, salvo la polarización, se mantienen los mismos valores para la horizontal.

Esta herramienta de simulación, mostrada en la Figura 3.1, calcula la propagación de la señal de radio a lo largo de diferentes entornos de túneles. El software, desarrollado en Matlab, permite al usuario diseñar y configurar el túnel para analizar la propagación en un entorno específico. En consecuencia, el software *Raylway* aporta la potencia recibida, el perfil potencia-retardo y el ángulo de llegada.

Este simulador permite configurar diversos parámetros para obtener resultados acordes con el túnel estudiado.



**Figura 3.1:** Interfaz de usuario del simulador con parámetros de configuración

- Túnel: definición de los diferentes tipos de sección transversal, más su forma y las propiedades de la sección longitudinal y del material de la pared.

Se puede diseñar definiendo el número de segmentos diferentes que tiene. A continuación, hay que definir la forma de todos estos segmentos. En primer lugar, la sección transversal: rectangular, TBM o personalizada donde, en el último caso, se puede importar al SW un fichero con una descripción de esta sección; después, la sección longitudinal que puede ser recta, curva o clotoide. Además, se pueden describir las características del material del muro.

- Transmisor: posición inicial fija, frecuencia y potencia transmitida.

Se fija la posición inicial respecto al túnel. Además, también se configuran la potencia transmitida, la frecuencia portadora y la antena. En particular, se puede importar el diagrama de radiación de cualquier antena específica con su polarización.

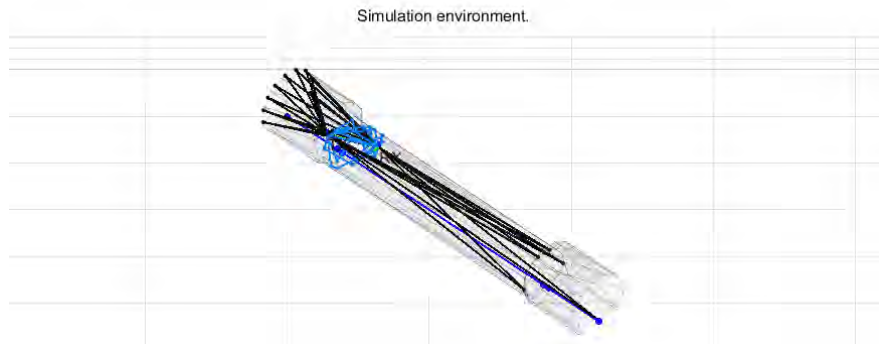
- Receptor: posición inicial, frecuencia y distancia recorrida.

Como en el caso del transmisor, la posición inicial y la configuración de la antena forman parte de la configuración. Además, se describe la distancia recorrida a lo largo del túnel y la posición.

- Antenas: diagrama de radiación de cada antena, polarización y posición relativa entre ellas.
- Configuración de la simulación: número de puntos de simulación, número máximo de reflexiones de cada rayo y posibilidad de habilitar la difracción.

Una vez configurado todo el escenario, se pueden seleccionar los parámetros de simulación en función de la precisión y el tiempo de cálculo que puede llevar la simulación. Por ello, se puede seleccionar el número de puntos a lo largo del túnel, el número máximo de reflexiones, la difracción y el número de facetas.

Una vez configurados los parámetros de entrada, el software presenta el escenario de simulación resultante. Para este experimento, el resultado de dicho escenario se muestra en la Figura 3.2.



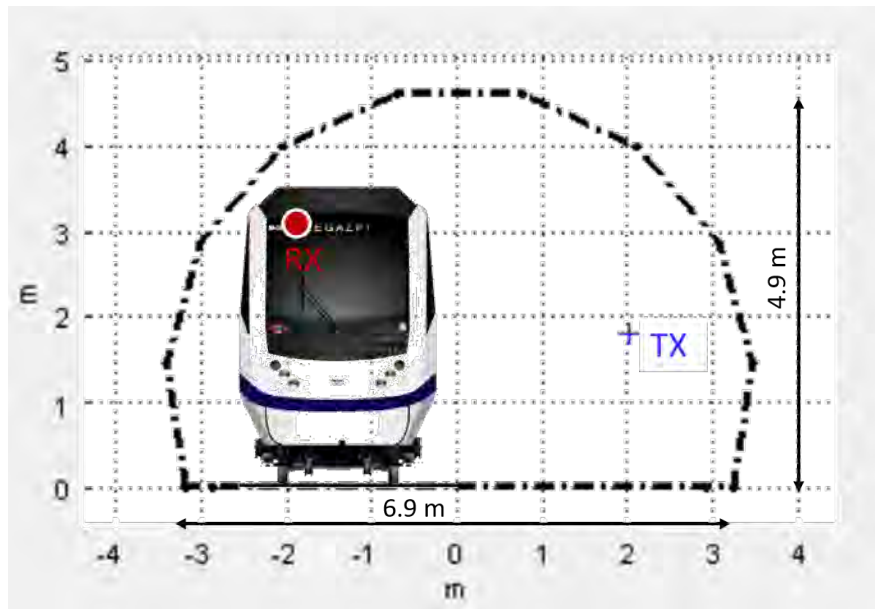
**Figura 3.2:** Escenario de simulación con Tx fijo (en negro) y Rx móvil (en azul)

### 3.1.2 Configuración del escenario de medidas

Además de realizar simulaciones, estas fueron comparadas con mediciones reales obtenidas en un entorno de ferrocarril metropolitano, lo que permitió validar los resultados y ajustar el modelo a condiciones operativas reales. Particularmente, se realizó un experimento en un túnel del Metro de Madrid. La Figura 3.3 ilustra el escenario con sus elementos más importantes. Los parámetros de configuración se enumeran en la Tabla 3.1.

Por un lado, el transmisor (Tx) está situado en una posición fija entre una estación y el túnel; por otro lado, el módulo receptor móvil (Rx) está situado en el parabrisas del tren. En los equipos Tx y Rx se utiliza el mismo modelo de antena.

El túnel es de tipo arqueado, que puede modelarse aproximadamente como una sección



(a) Escenario de simulación: Dimensiones y forma de la sección transversal del túnel



(b) Escenario de medición: Posición fija de Tx al principio del túnel y Rx en movimiento en el parabrisas del tren

**Figura 3.3:** Escenarios desde el punto de vista de la simulación y del escenario real de medición

transversal rectangular equivalente, ya que existe una ligera adaptación de las dimensiones, de acuerdo con [144]. Para aplicar el modelo de propagación modal descrito en la Sección 2.3, en este caso, las dimensiones son 6,9 m x 4,9 m con un radio de 2,2 m, como muestra la Figura 3.3(a). La ruta evaluada sigue una línea recta de 350 m con una pendiente

menor de 5,7 ‰. El punto 0 representa donde se sitúa el Tx.

**Tabla 3.1:** Mediciones en túnel en ondas milimétricas. Parámetros de configuración

Parámetro	Valor
Frecuencia	24.2 GHz
Potencia transmitida	5.4 dBm
Señal transmitida	Onda continua
Antena Tx y Rx	Antena de bocina, 15.2 dBi
Antena HPBW	Plano E: 28.3°, Plano H: 27.9°
Polarización de la antena	Horizontal y vertical
Sección del túnel	Arqueado
Dimensiones del túnel	6.9 m x 4.9 m
Velocidad media del tren	5 km/h

La Tabla 3.1 proporciona una descripción detallada de los parámetros utilizados en las mediciones de ondas milimétricas en un entorno de túnel. Se utilizó una frecuencia de 24.2 GHz, una banda de ondas milimétricas aproximada a la regulación explicada en la Sección 1.1.6. Estas bandas son ideales para estudios de propagación en ambientes confinados. Se ha utilizado una potencia de transmisión de 5.4 dBm. La señal transmitida fue una onda continua, permitiendo un análisis preciso de la atenuación de la señal. Las antenas de transmisión y recepción, con una ganancia de 15.2 dBi, con anchos de haz a mitad de potencia de 28.3° en el plano E y 27.9° en el plano H. La sección arqueada del túnel, con dimensiones, es de 6.9 m x 4.9 m. El tren hace un desplazamiento a 5 km/h hasta distanciarse del Tx unos 350 m, siguiendo exactamente la misma ruta en ambos experimentos.

## 3.2 Resultados de las medidas

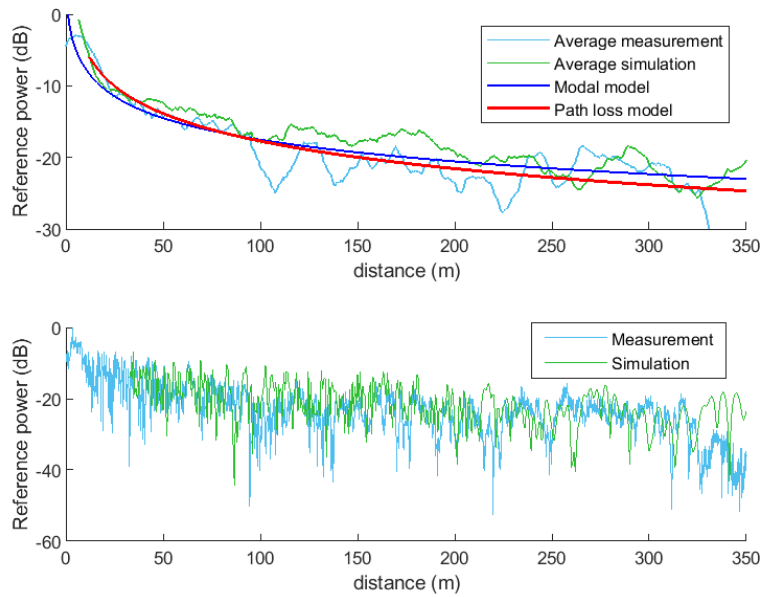
En esta sección, se aplican tanto los análisis modales como la técnica RT junto con las mediciones realizadas en un túnel ferroviario metropolitano real con el fin de evaluar la propagación en este entorno particular en la banda de 24 GHz, y aplicable a las bandas entre 24 y 30 GHz.

El análisis se centra en el modelo de pérdida de trayecto y en el desvanecimiento rápido como se describe en la Sección 2.1. Asimismo, se muestran las pérdidas modales teóricas para comparar estas diferentes aproximaciones. Por último, estos resultados son comparados con las simulaciones con las diferentes polarizaciones. Para ello, se han realizado dos experimentos: el primero con polarización vertical en ambas antenas, y el segundo con polarización horizontal.

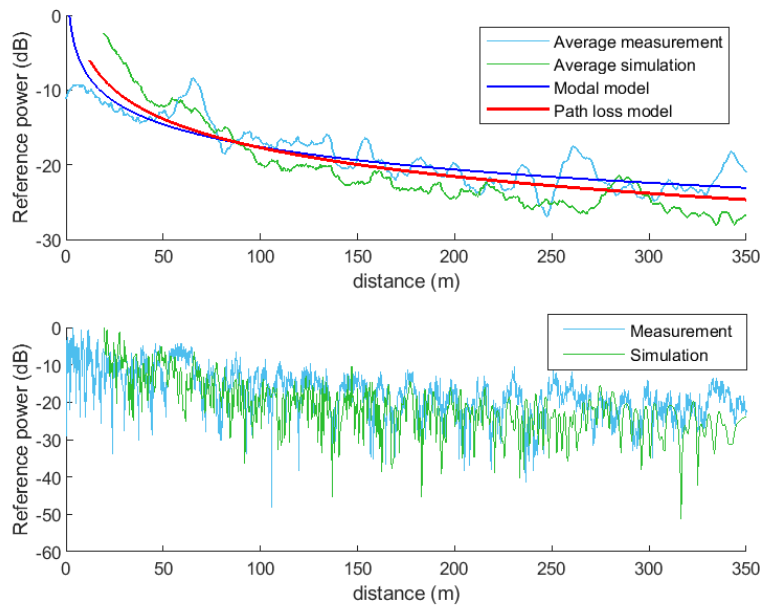
### 3.2.1 Modelo de pérdidas de camino y desvanecimientos lentos

La Figura 3.4 presenta la potencia recibida de los datos empíricos, el resultado de la simulación, el modelo modal teórico y el modelo de pérdidas de trayecto resultante para los experimentos

vertical, Figura 3.4(a), y horizontal, Figura 3.4(b), respectivamente.



(a) Polarización vertical



(b) Polarización horizontal

**Figura 3.4:** Comparación entre mediciones, simulación y modelo modal para polarización vertical y horizontal

Debido a que las antenas son altamente directivas, como muestra la Figura 3.4, las pérdidas causadas por la desalineación de la antena son altas para distancias inferiores a 20 m. Además,

las simulaciones RT tienen una fuerte dependencia del número de reflexiones para distancias cortas. Por lo tanto, los resultados de la simulación no son exactos y los primeros 20 m se han eliminado de la Figura 3.4.

En ambos experimentos, las mediciones exponen un exponente de pérdida,  $n$ , igual a 1,3 aproximadamente, que es inferior al decaimiento del espacio libre. Según estos resultados, el modelo de pérdidas del camino se puede representar mediante la Ecuación 3.1. Además, como explican [147] y [148], independientemente del tipo de túnel, los exponentes de pérdidas son siempre inferiores a los del espacio libre. Esto se debe al efecto de guía de ondas que se produce en los túneles.

$$L(d) = A(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \chi_\sigma \quad (3.1)$$

La curva obtenida del análisis modal presenta una atenuación similar ya que los exponentes de pérdida son 1 para polarización vertical y 1,1 para horizontal. Esto muestra un efecto significativo de la propagación modal. Asimismo, los resultados de la simulación son ligeramente superiores a los obtenidos por las medidas ya que el exponente de pérdidas es 1,8 para la polarización vertical y 1,9 para la horizontal. Estos resultados se resumen en la Tabla 3.3.

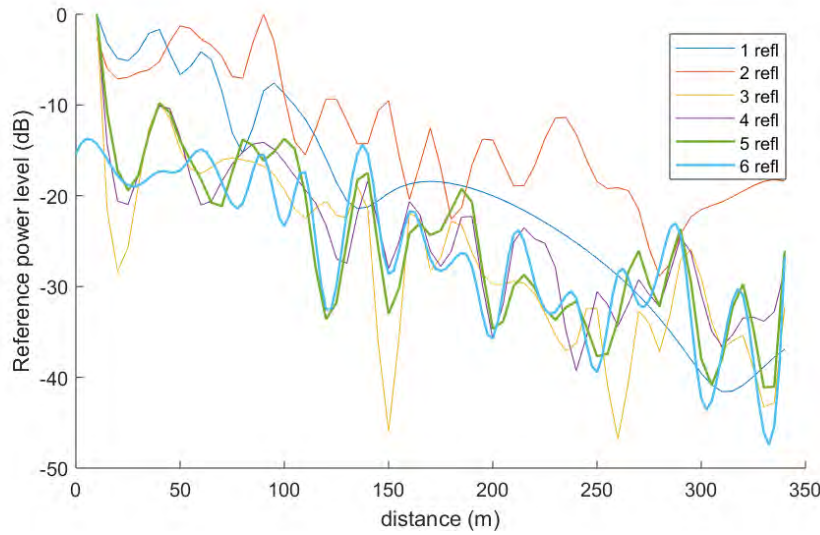
**Tabla 3.3:** Mediciones en túnel en mmW. Comparación entre el exponente de pérdida de trayectoria

Parámetro	Vertical	Horizontal
Atenuación de referencia, $A(d_0)$	64.8 dB	62.9 dB
Medida $n$	1.28	1.29
Simulación $n$	1.8	1.9
Modelo de propagación de modos $n$	1	1.1
Medidas $\chi_\sigma$	1.4	1.3
Simulación $\chi_\sigma$	1.2 dB	0.9 dB

La atenuación es en el punto de referencia,  $d_0$ , de 20 m

Las diferencias entre modelos pueden producirse porque, por un lado, en el modelo modal sólo se tienen en cuenta las pérdidas causadas por las reflexiones; y, por otro, en el caso de las simulaciones RT, el número máximo de reflexiones utilizado se limita a seis, lo que parece no ser suficiente para calcular un modelo más preciso; sin embargo, a cierta distancia, los resultados convergen cuando las reflexiones son suficientemente altas, como muestra la Figura 3.5.

No obstante, en todos los casos, los exponentes de pérdida son menores que en el espacio libre, lo que muestra un claro efecto de guía de ondas. Esto se debe a que las ondas electromagnéticas se reflejan repetidamente en las paredes del túnel. Como el hormigón está hecho de materiales conductores (entre otros), el coeficiente de reflexión es elevado. Por ello, las ondas quedan confinadas en el dieléctrico por reflexión interna casi total en su superficie.



**Figura 3.5:** RT Resultados de la simulación para un número diferente de reflexiones de cada rayo

En las bandas de mmW, un gran número de modos se propagan a través del túnel. En particular a 24,2 GHz, de acuerdo con las frecuencias de corte de la teoría de guía de ondas rectangular, por el túnel se propagan hasta modos  $m$  y  $n$  iguales a 1246 y 1877 respectivamente.

Por ello, el punto de ruptura, donde la mayoría de ellos se extinguen suficientemente, se localiza a partir de unos cientos de metros en frecuencias más bajas (de 1 a 6 GHz) [143]. Sin embargo, a 24,2 GHz, se encuentra a 8 km, lo que significa que, teóricamente, la ruta se sitúa totalmente en la región de la guía de ondas.

La polarización parece ser independiente del exponente de pérdidas ya que no muestra una diferencia sustancial en ninguno de los casos. Esto también es cierto para los desvanecimientos lentos, cuya desviación estándar es prácticamente igual en ambas polarizaciones.

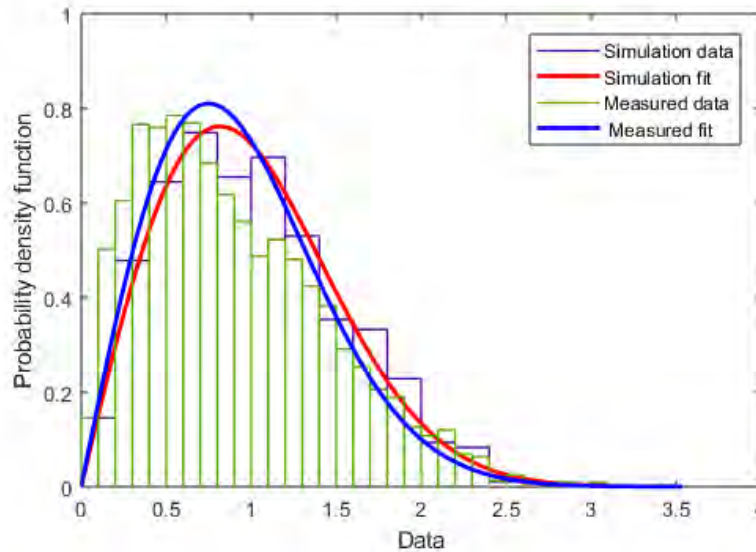
El efecto de la pendiente revela una diferencia interesante en ambas polarizaciones. Existe una pendiente de 5,7 por mil. Así, centrándonos en la media de los últimos 50 m donde esta pendiente tiene su mayor efecto, hay mayores pérdidas en la polarización vertical. Este resultado se observa en las simulaciones y en las mediciones. Puede deberse, en primer lugar, al desalineamiento general de ambas antenas; y, en segundo lugar, a que este efecto es más notable en polarización vertical ya que estas antenas presentan mayor directividad en elevación que en acimut.

En cuanto a la atenuación de referencia,  $A(d_0)$ , existe una ligera diferencia entre polarizaciones. En el caso de la polarización horizontal, hay 2 dB más que en la vertical. Esto está relacionado con las dimensiones del túnel, que están directamente relacionadas con el efecto de la polarización en las antenas. Cuando el túnel presenta una anchura mayor que su altura, aparecen mayores coeficientes de reflexión en polarizaciones verticales. Para el caso de polarización horizontal se produce una atenuación menor. Este efecto es más significativo en distancias cortas. Como explica [149], en los túneles donde hay una sección transversal perfectamente cuadrada, el resultado de la polarización vertical y horizontal será exactamente

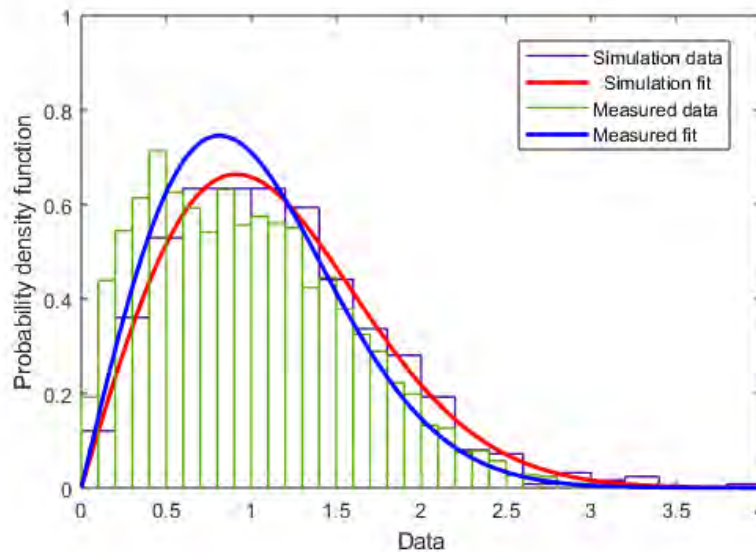
el mismo.

### 3.2.2 Desvanecimiento rápidos

Los resultados de desvanecimiento rápido para las polarizaciones vertical y horizontal se describen en la Figura 3.6, donde se muestra una comparación entre las mediciones y las simulaciones.



(a) Polarización vertical



(b) Polarización horizontal

**Figura 3.6:** Comparación entre mediciones y simulación de la función de densidad de probabilidad de desvanecimiento rápido

La distribución de Rician,  $P_r(r)$ , es un modelo estadístico que describe mejor el efecto de desvanecimiento rápido en un entorno donde existen condiciones LoS. A esta frecuencia, como enumera la Tabla 3.5, el canal varía considerablemente rápido independientemente del experimento, ya que la longitud de onda es pequeña, 12,4 mm.

**Tabla 3.5:** Mediciones en túnel en mmW. Parámetros principales del desvanecimiento rápido

Parámetro	Vertical	Horizontal
Medidas del factor $K$	2.62 dB	2.62 dB
Simulación del factor $K$	2.79 dB	2.62 dB
Medidas de la desviación estándar	0.55	0.59
Simulación de la desviación estándar	0.52	0.61

Como presenta la Figura 3.4, existen picos de hasta 25 dB de atenuación en ambos casos. La polarización horizontal muestra una mayor inmunidad a los desvanecimientos lentos de la señal, aunque existe un impacto insignificante en el desvanecimiento rápido en comparación con la polarización vertical.

Sin embargo, en general, el desvanecimiento rápido tiene un efecto sustancial sobre la señal, como muestra la Figura 3.4. Esto ocurre cuando el tiempo de coherencia del canal es pequeño en relación con el requisito de retardo de la aplicación. En este caso, el cambio de amplitud y fase impuesto por el canal varía considerablemente a lo largo del período de uso.

En cuanto al factor  $K$ , los tres escenarios presentan resultados similares. La relación entre LoS y la componente multitrayecto es muy baja. Esto se debe a que, como se ha descrito en apartados anteriores, el efecto de guía de ondas permite la propagación de un elevado número de modos a esta frecuencia. Como resultado, la señal recibida no es sólo esencialmente de la componente LoS, sino la suma de todas las señales reflejadas a lo largo del túnel.

### 3.3 Conclusiones de comunicaciones en banda de ondas milimétricas

Este estudio muestra mediciones de la propagación en túneles a la frecuencia de 24 GHz, y aplicable a las bandas de entre 24 y 30 GHz, en un tramo de unos 500 m. Los resultados muestran que la propagación es favorable, con el objetivo de caracterizar la baja atenuación de 74 dB/100 m, según el modelo de pérdidas del camino presentado en la Ecuación 3.1. El canal radioeléctrico se ha modelado estimando también su modelo estadístico del canal, obteniendo el factor  $K$ , de unos 3 dB.

Como resultado de las mediciones y modelos realizados, se puede concluir que la viabilidad de uso de señales a 24 GHz es positiva, debido al efecto de guía de onda que ofrece el túnel. Esto permite considerar el uso de estas frecuencias en futuros sistemas de comunicaciones ferroviarias.

# Capítulo 4

## Comunicaciones inalámbricas en los subsistemas del tren

Este capítulo presenta las medidas realizadas para analizar el canal una vez que se ha separado el tráfico de los interiores y de los exteriores de los trenes. El propósito es transmitir señales de menor potencia para mejorar la calidad y eficiencia del canal de comunicación. Asimismo, el objetivo es conectar el bus de control y monitorización del tren (TCMS) de forma inalámbrica. Esto permite conectar nuevos dispositivos sin la necesidad de cablear el tren.

También se va a analizar las comunicaciones entre trenes con el objeto de conectar los buses TCMS de ambos y poder realizar acoplamientos virtuales.

Con este fin, el capítulo describe el modelo de canal obtenido para este caso de prueba compuesto de un modelo empírico de pérdidas del camino y un modelo estadístico de desvanecimientos rápidos.

En este trabajo se presenta un estudio del modelado de la propagación de canal para la banda de 2,6 GHz en el interior de trenes. Las medidas se han realizado en el metro de Madrid en diferentes entornos propios del ferrocarril, tales como los túneles, estaciones y escenarios al aire libre. La frecuencia de 2,6 GHz se ha seleccionado para obtener medidas libres de interferencias con propiedades de propagación similares a las de la banda ISM a 2,4 GHz, ampliamente utilizada para desplegar sistemas de comunicación.

### 4.1 Pruebas realizadas y metodología

Las medidas tienen como objetivo caracterizar el comportamiento del canal de comunicaciones del propio tren con diferentes topologías de las antenas. Para ello, se han realizado recorridos con trenes metropolitanos en líneas del Metro de Madrid, dado que éste representa un entorno completamente representativo del objeto de estudio.

En análisis de estas mediciones ha sido evaluado el canal radioeléctrico para la comunicación inalámbrica en un entorno ferroviario. En particular, se diferenciarán entre los tres sub-escenarios más representativos: estaciones, túneles y exteriores.

### 4.1.1 Tipos de pruebas

Para realizar una caracterización fidedigna de los distintos escenarios, se efectuarán medidas tanto en banda estrecha como en banda ancha con los parámetros de transmisión definidos en Tabla 4.1.

En el caso de las medidas de banda estrecha, se transmite una señal de onda continua empleando como transmisor un generador de señal de Rohde&Schwarz modelo SMA 100A 10 kHz- 6 GHz y una antena de banda ancha de Mobile Mark modelo MGRM-WHF-3C-BLK-120 M.

La señal transmitida se recibe por medio de un equipo de radio software tipo USRP 2100 de National Instruments que permite, a través de un PC, generar prototipos inalámbricos de dos canales haciendo uso de un software propietario.

El sistema se ha configurado con una frecuencia central de 2,6 GHz, con un ancho de banda de 100 MHz y transmitiendo una potencia máxima de salida de 42 dBm. Se ha conectado al transmisor una antena monopolo de banda ancha y al receptor un array de antenas compuesto por 6 antenas directivas. El array de antenas se conmuta automáticamente y el sistema va registrando el ángulo de llegada de la señal, midiendo la respuesta al impulso en cada dirección del array. Esta configuración se ha utilizado para medir diferentes escenarios en el Metro de Madrid.

Este equipo ha registrado la señal recibida a una frecuencia de muestreo de 100 Hz mientras el tren se desplazaba a una velocidad constante de 18 km/h por la línea 10 de Metro de Madrid para las pruebas en movimiento. Esta línea se ha seleccionado porque cubre los tres entornos de propagación seleccionados, es decir, túneles, estaciones y campo abierto.

En el caso de las medidas de banda ancha, se utiliza un *Channel Sounder* [150] compuesto por un transmisor y un receptor LTE diseñado y desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid. El Tx es capaz de transmitir una señal en un rango de frecuencias comprendido entre 500- 6010 MHz; el Rx recibe señales entre 400- 7000 GHz.

En este caso, el tipo de antena utilizada tanto en transmisión como en recepción es un monopolo de banda ancha de ganancia 5 dBi con dimensiones 45 mm de diámetro y 76 mm de altura. La potencia máxima son 40 dBm.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las medidas de recepción de potencia para banda estrecha y el perfil de retardo de potencia en banda ancha.

El formato es el siguiente:

- Al principio del apartado, se describe la topología de antenas que se ha utilizado en cada medición.
- Seguidamente, se muestran las medidas realizadas en los sub-escenarios.
- Después, se muestra el modelo empírico de pérdidas del camino y el modelo estadístico de desvanecimientos rápido para cada sub-escenario.
- Por último, se muestran los parámetros de la función densidad de probabilidad de las medidas realizadas.

**Tabla 4.1:** Parámetros de transmisión en banda estrecha

Parámetro	Valor
<b>Banda estrecha</b>	
Potencia Transmisión (dBm)	19
Frecuencia de portadora (MHz)	2600
Ancho de Banda (MHz)	Onda continua
Periodo de muestreo	100 muestras por segundo
Antenas Tx/Rx	MGRM-WHF 3dBi ganancia 2.1-6 GHz
<b>Banda ancha</b>	
Potencia Transmisión	42 dBm
Frecuencia de portadora	2600 MHz
Ancho de Banda	100 MHz
Modulador	Pulsos
Demodulador	Detector logarítmico
Ancho de pulso	10 ns
Periodo de pulso	1 $\mu$ s
Antenas Tx/Rx	MGRM-WHF 3dBi ganancia 2.1-6 GHz

## 4.2 Escenarios del estudio de la propagación en interior de trenes

Se han analizado tres escenarios para las medidas del intra-tren. Por un lado, se evalúa el efecto de propagación a lo largo del interior del tren, y, por el otro, se estudia el efecto de una comunicación interior-exterior y exterior-exterior dentro del área de un mismo tren.

### 4.2.1 Medidas en a lo largo del interior de tren

El enlace del interior del tren, representado en la Figura 4.1, se ha medido en distintos escenarios ferroviarios: túneles, estaciones y espacios abiertos. Además, este enlace del interior del tren se ha analizado en dos tipos diferentes de trenes, un tren continuo y un tren no continuo.

En la Figura 4.1 se muestra una imagen del tren continuo y otra del tren no-continuo. En el primero hay un pasillo entre coches y en el segundo hay dos puertas entre la zona de pasajeros de ambos coches.

Las mediciones en ambos trenes permiten comprobar el impacto de la separación entre coches en este tipo de enlaces. Las antenas se han colocado sobre un trípode en el interior del tren a una distancia de 15 m entre sí, como se muestra en la Figura 4.2.

En esta Figura, se presenta, por un lado, cómo es el tren por dentro; al fondo, el lugar donde



**Figura 4.1:** Trenes continuos (izquierda) y no continuos (derecha)

se encuentra la antena receptora; y por último, cómo es la interconexión entre los coches.



**Figura 4.2:** Escenario de medida para las pérdidas del camino dentro del tren.

#### **4.2.2 Medidas para comunicaciones con enlace exterior-exterior e interior-exterior al tren**

La medida de antenas exteriores consiste en situar tanto la antena receptora como la transmisora en la cubierta del tren a una distancia de 1,2 m. El tren comenzará a recorrer la línea de metro a una velocidad media de 12 km/h. El esquema de medida está representado en

Figura 4.3 (a).

En la Figura 4.3 (a) se puede ver la disposición de las antenas en la cubierta del tren. Se observa que alrededor de varios elementos metálicos y otros de aluminio que tienen una altura mayor que las antenas.



(a) Posición de las antenas exteriores



(b) Posición de las antenas Exterior-interior.

**Figura 4.3:** Disposición de las antenas en las medidas intra-tren

Estas medidas son útiles para la implementación de sistemas de acoplamiento virtual o transmisión de datos de banda ancha entre vagones para simplificar el complejo mantenimiento y ensamblaje de los vagones, al menos para la transmisión de datos.

La Figura 4.3 representa la ubicación de los equipos para la realización de las medidas de exterior a interior del tren.

Para caracterizar este enlace, se ha fijado una antena transmisora en el techo de un tren CAF S8000-2 del Metro de Madrid y se ha colocado una antena receptora en un trípode dentro del vagón. La Figura 4.3 presenta el escenario de medidas con sus antenas monopolo de banda ancha Mobile Mark MGRM-WHF.

### 4.3 Modelado de pérdidas del camino de en el interior de un tren

Para obtener la pérdida de trayecto del enlace para el interior del tren, se ha instalado una antena transmisora en el vagón delantero y la antena receptora se ha desplazado a lo largo del tren, como se indica en la sección previa, y se han realizado mediciones de banda estrecha.

La medida de pérdidas del camino de un tren consiste en recorrer el tren longitudinalmente para calcular la atenuación producida en la señal receptora cuando el Rx se aleja del Tx. El análisis considera tipos de trenes con coches unidos a través de interconexiones en forma de fuelle (trenes continuos) y trenes con vagones separados (trenes no-continuos).

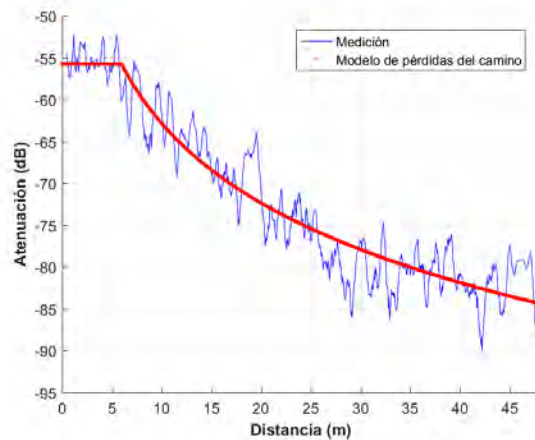
Los resultados de pérdida de trayecto se muestran en la Figura 4.4 para un tren continuo y no continuo, respectivamente. Además, se ha obtenido un modelo de pérdida de trayecto log-distancia para cada tipo de tren. En el caso del tren continuo, se ha elegido un modelo de dos pendientes debido a la diferente naturaleza de la señal recibida cerca y lejos del transmisor. Las ecuaciones de estos modelos se expresan en Ecuación (4.2) y Ecuación (4.1), para tren continuo y no continuo, respectivamente.

$$A(dB) = 22,37 \cdot \log(d(m)) + 40,5 \quad (4.1)$$

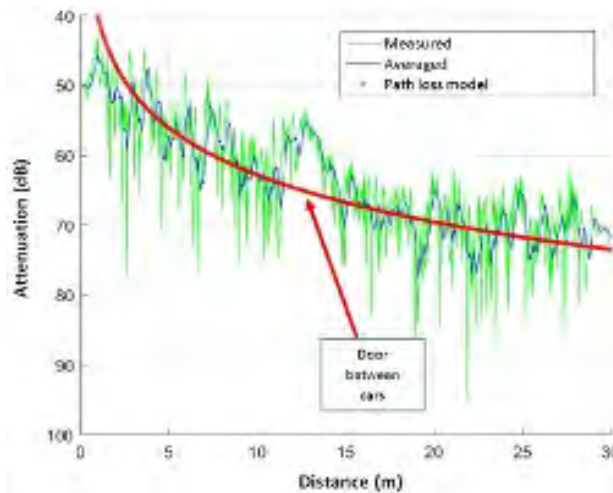
$$A(dB) = \begin{cases} 55,8 & \text{si } d < 6 \\ 31,6 \cdot \log(d(m)) + 31,2 & \text{si } d \geq 6 \end{cases} \quad (4.2)$$

El tren no-continuo, presenta un modelo de pérdidas del camino que sigue la fórmula general (Ecuación 4.1) detallada en la Sección 2.1 donde se observa un claro escalón en la transición entre vagones con un comportamiento no lineal y su continuación respeta el modelo clásico. En esta transición no se espera hacer uso de este tipo de comunicaciones, por ese motivo, puede considerarse irrelevante.

El tren continuo (Ecuación 4.2) presenta una variación del modelo general descrito en la Sección 2.1 para analizar este caso particular.



(a) Modelo de pérdida de trayecto para un tren continuo en el interior del tren.

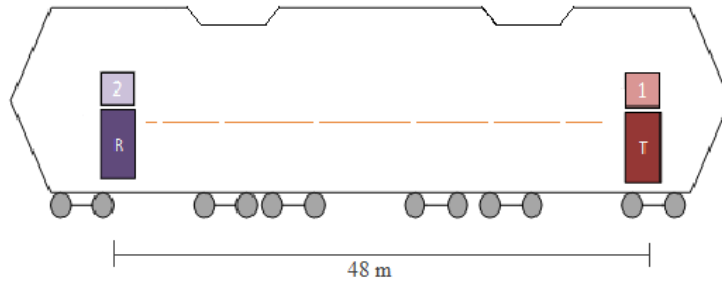


(b) Modelo de pérdida de trayecto para un tren no-continuo en el interior del tren.

**Figura 4.4:** Resultados de banda estrecha para las comunicaciones intra-tren

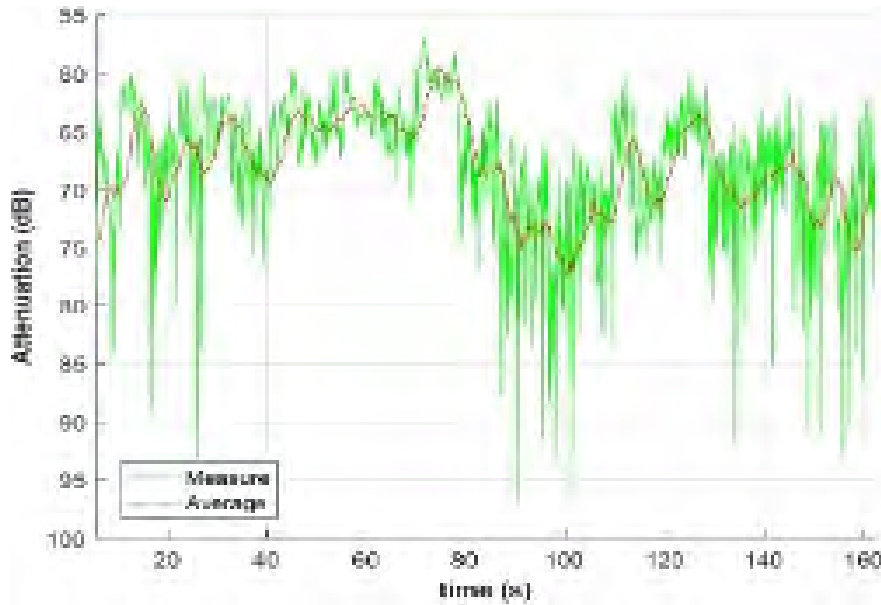
Puede observarse que cerca del transmisor el exponente de pérdida de trayecto ( $n$ ) es muy pequeño (inferior a 0,5), por lo que la pérdida de trayecto puede estimarse con un valor constante. Alejándose más, el exponente de pérdida de trayecto es 3,1, superior al valor en espacio libre; esto se debe a las reflexiones en las estructuras internas del tren (por ejemplo, paredes, barras verticales de sujeción, interconexiones entre vagones, etc.).

La presencia de personas en el interior del tren continuo es un parámetro importante del modelado del canal y se midió realizando mediciones de banda estrecha a lo largo del tiempo con movimiento aleatorio de personas. Los resultados se muestran en la Figura 4.6. Se observa un desvanecimiento de la señal de hasta 30 dB, así como variaciones promediadas de 10 dB, por lo que para este tipo de situaciones sería recomendable el uso de soluciones MIMO o con



**Figura 4.5:** Medidas con antenas interiores.

diversidad espacial.



**Figura 4.6:** Impacto del movimiento de personas para el tren continuo.

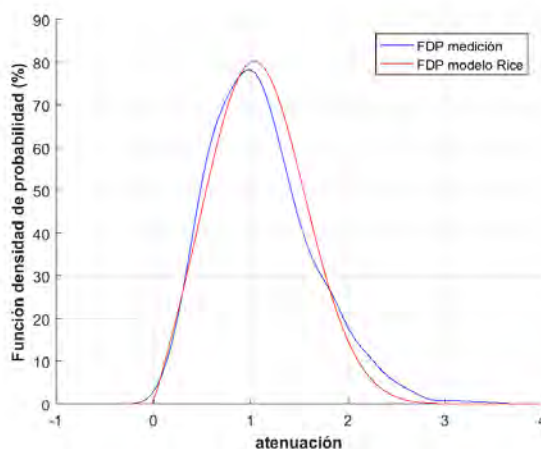
La Figura 4.6 muestra el efecto de la puerta para el tren no-continuo, que genera un desvanecimiento por sombra. Se puede observar también que para este tren el exponente de pérdida de trayecto es de 2,2, inferior al encontrado en el tren continuo. Esto se debe a la mayor densidad de estructuras metálicas en el tren continuo, como se muestra en la Figura 4.1. En cualquier caso, ambos exponentes de pérdida de trayecto no son comparables debido a la diferencia entre ambos modelos de pérdida de trayecto, donde uno de ellos es un modelo de dos pendientes. Pero teniendo en cuenta que el modelo de tren no continuo es un diseño de estructura metálica interior más antiguo, su exponente de pérdida de trayecto indica una mejor aproximación a la propagación del efecto de guía de ondas similar al explicado en el Capítulo 3.

A continuación se analiza en detalle el tren continuo.

Por un lado, en distancias menores al límite de 6 m se obtiene un modelo de pérdidas del camino que se puede aproximar a una constante dado que la pendiente de pérdidas es menor de 0,05. Por el otro lado, a partir de este límite se obtiene una pendiente de pérdidas del camino de 3,16 lo que implica unas pérdidas superiores a las pérdidas producidas en el espacio libre. Esto es debido a la atenuación adicional que se produce en los pasillos situados entre los coches y otros elementos como los asientos o barras de apoyo de los pasajeros.

El análisis estadístico del desvanecimiento a pequeña escala de la señal se obtiene eliminando el desvanecimiento a gran escala del canal y comprobando qué Funciones de Densidad de Probabilidad (PDF) teóricas se ajustan mejor al resultado. Para obtener el desvanecimiento a gran escala del canal, se han promediado los datos de banda estrecha cada 40 muestras; se ha elegido este valor porque elimina las variaciones de alta frecuencia debidas al multitrayecto y mantiene las variaciones lentas de la atenuación medida.

La PDP sigue una distribución Rice dado que en todo momento hay visión directa entre la antena receptora y transmisora. El resultado del modelado estadístico se muestra en la Figura 4.7, donde una distribución de Rician teórica se ajusta a los datos medidos, indicando la presencia de trayectoria LOS a pesar del movimiento aleatorio de las personas, resultado en un factor K de 1,5538 y una desviación típica de 0,5413.



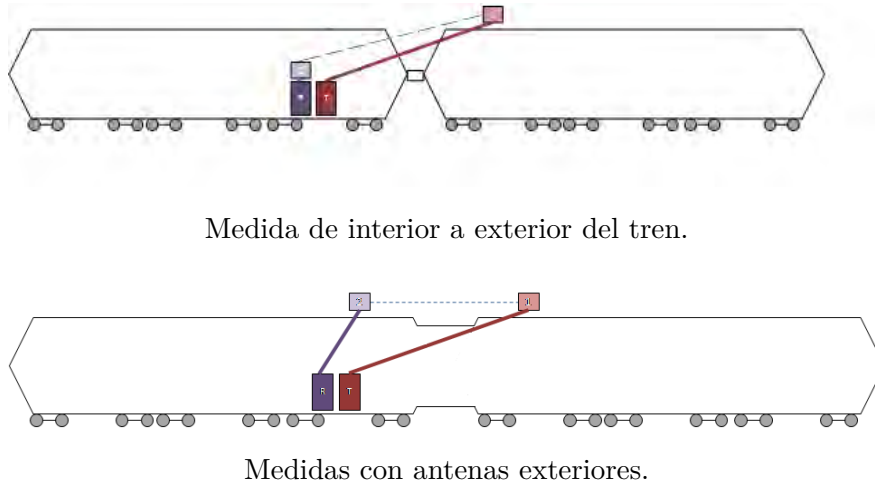
**Figura 4.7:** Función de densidad de probabilidad (tren continuo) con movimiento de personas de las pérdidas del camino

No obstante, el factor K es menor que 0, lo que implica que la energía que llega al receptor por las componentes de multitrayecto es superior a la energía que aporta la componente de visión directa. Esto se traduce en una influencia muy fuerte de los desvanecimientos rápidos.

En definitiva, para modelar el comportamiento del canal de este tipo de tren es necesario emplear un modelo de pérdidas del camino de dos pendientes que diferencia entre la zona antes de la interconexión entre trenes y después de ésta. Además, se observa una elevada influencia de las componentes de multitrayecto, lo que provoca fuertes desvanecimientos de hasta 10 dB de caída de la señal.

## 4.4 Medidas para enlace exterior-exterior al tren e interior-exterior

En las medidas de banda estrecha, adicionalmente, se ha colocado una antena en el interior de uno de los coches para analizar la señal que llega al interior del tren. El esquema de esta disposición de antenas está representado en la Figura 4.8.



**Figura 4.8:** Esquema de medición en medidas intra-tren.

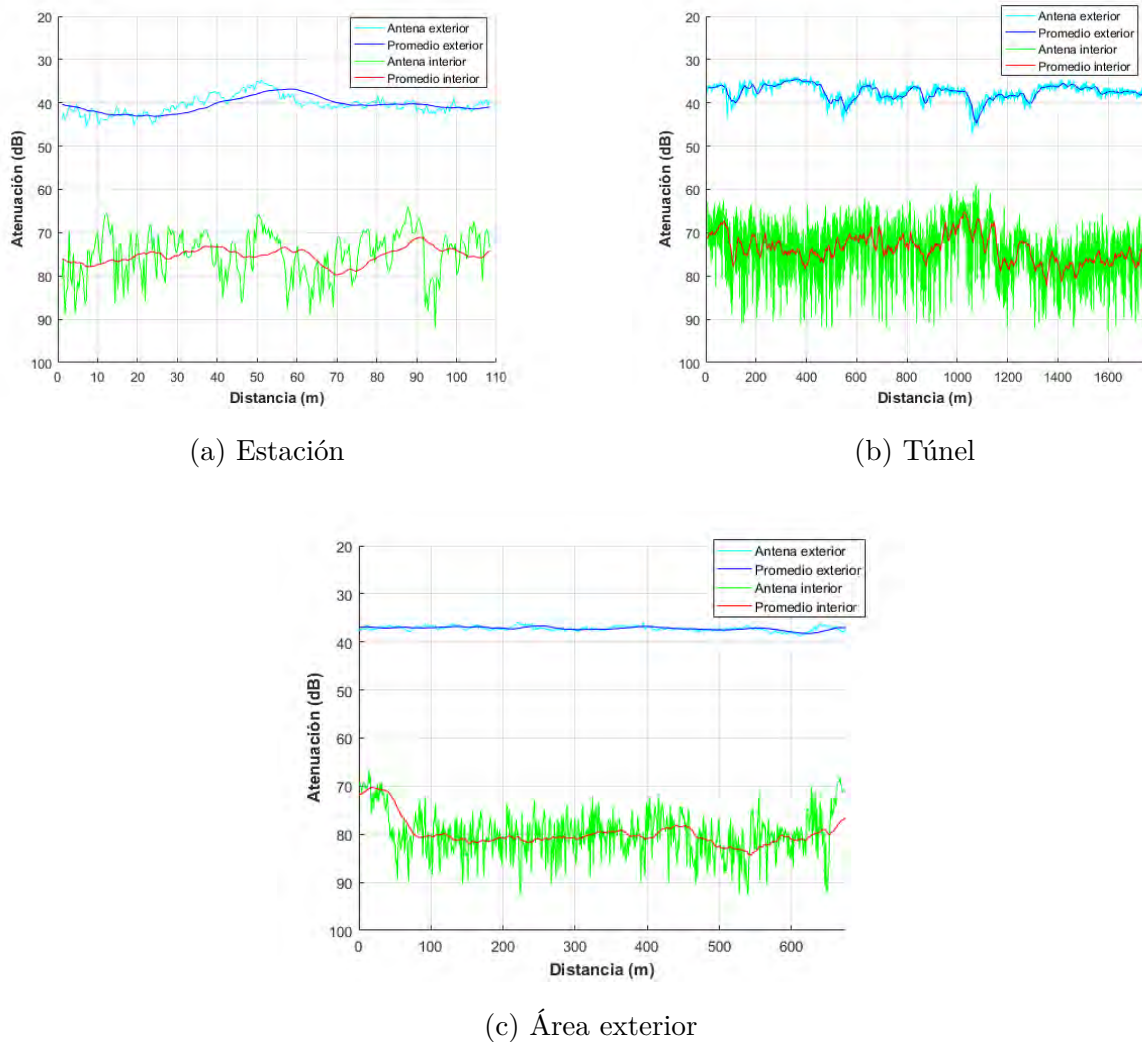
En el análisis de desvanecimientos lentos se muestran los diferentes resultados obtenidos para cada uno de los sub-escenarios. La Figura 4.9 representan las medidas obtenidas para la antena situada en la cubierta del tren y en el interior de uno de los coches. Estas medidas se han acompañado de su correspondiente representación de los desvanecimientos lentos a través de un promedio a 40 muestras.

Primeramente, según la Tabla 1, el valor medio de atenuación para la antena exterior en una estación es 3 dB mayor que el promedio de los otros sub-escenarios. Esto puede deberse a que hay una cantidad de muestras menor que el resto de los entornos. Igualmente, se observa en la señal de la estación que se ha producido un desvanecimiento importante al principio del recorrido. Por todo ello, la media tiene menos fiabilidad que en el resto.

En segundo lugar, la zona donde llega una señal más alta a la antena interior es en el túnel. Se observa una vez más cómo los túneles tienen un comportamiento similar a una guía-onda, por su geometría y por la cantidad de materiales conductores que lo envuelven. Esta característica de los túneles favorece que la energía se confine y su atenuación global sea menor.

En relación a los desvanecimientos rápidos, se explica el análisis estadístico de los desvanecimientos rápidos para modelar de manera adecuada todos los efectos producidos en el canal radioeléctrico.

Para ello, de las medidas obtenidas se ha eliminado la parte correspondiente a los desvanecimientos lentos—esto es, el promediado mostrado en las gráficas del apartado anterior— y se han ajustado las funciones de densidad de probabilidad que mejor se adaptan a cada una de las señales.

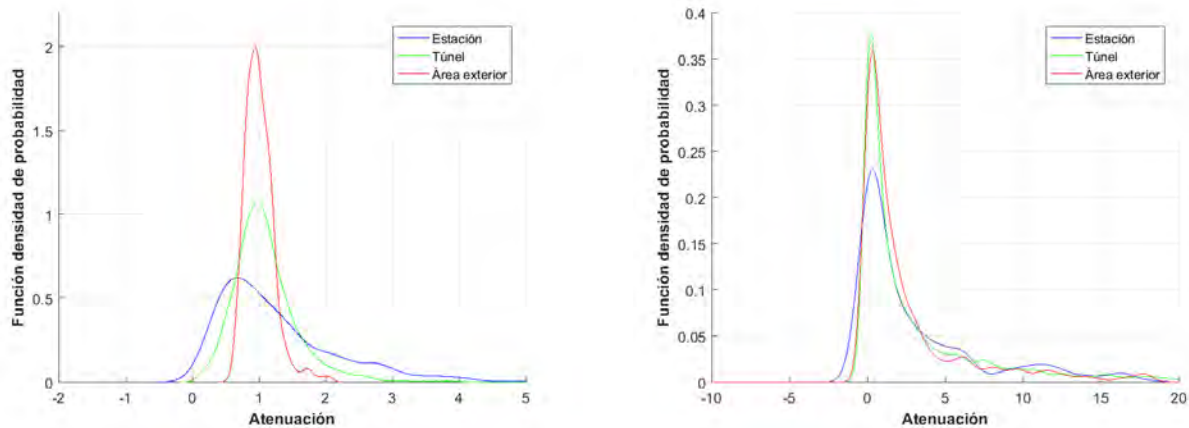


**Figura 4.9:** Medidas en banda estrecha en diferentes ubicaciones: (a) Estación, (b) Túnel, (c) Área exterior.

En la Figura 4.10 se han representado a la izquierda las PDP de las antenas colocadas en la cubierta del tren y a la derecha las PDP de las antenas colocadas en el interior del tren. Se aprecia cómo las medidas referidas a antenas del exterior se ajustan a una PDP Normal o Gaussiana. De hecho, la diferencia entre ellas, según la Tabla 3, es la desviación típica que, como era de esperar, es considerablemente mayor para estación, dado que es un entorno que se aproxima más al espacio libre.

En el caso de las antenas interiores, siguen una función de densidad de probabilidad Rayleigh dado que no hay visión directa con la antena transmisora. Como en el caso de las exteriores, la estación también tiene una desviación típica mayor que en el resto de los sub-escenarios.

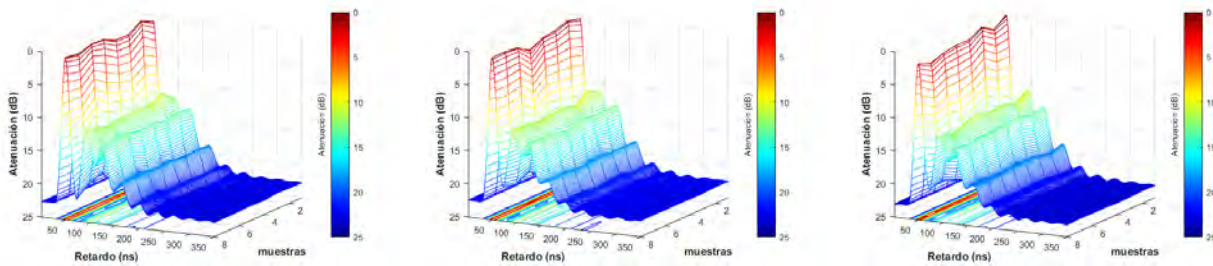
Se observa, tanto en la Figura 4.10 como en la Tabla 3, que en el sub-escenario donde se produce mayor fluctuación de la señal es la estación. Esto ocurre porque hay una gran cantidad de reflexiones, como en el caso de los túneles, y también se produce un gran efecto de difracción



**Figura 4.10:** Funciones densidad de probabilidad para banda estrecha de las antenas exteriores (izquierda) e interiores (derecha).

en los objetos y paredes con picos. Esto hace que de las reflexiones y difracciones producidas resulte una señal "desordenada" que tenga una variabilidad mayor en comparación con los otros casos.

Las medidas de banda ancha se muestran en la Figura 4.11, donde se han promediado todas las muestras obtenidas en cada uno de los sub-escenarios. El valor máximo es respecto a los máximos de entorno por separado. No obstante, en la Figura 4.11, se presentan ocho de las muestras obtenidas en las mediciones de cada uno de los ambientes. El resultado obtenido muestra una variación mínima entre los distintos perfiles de retardo.

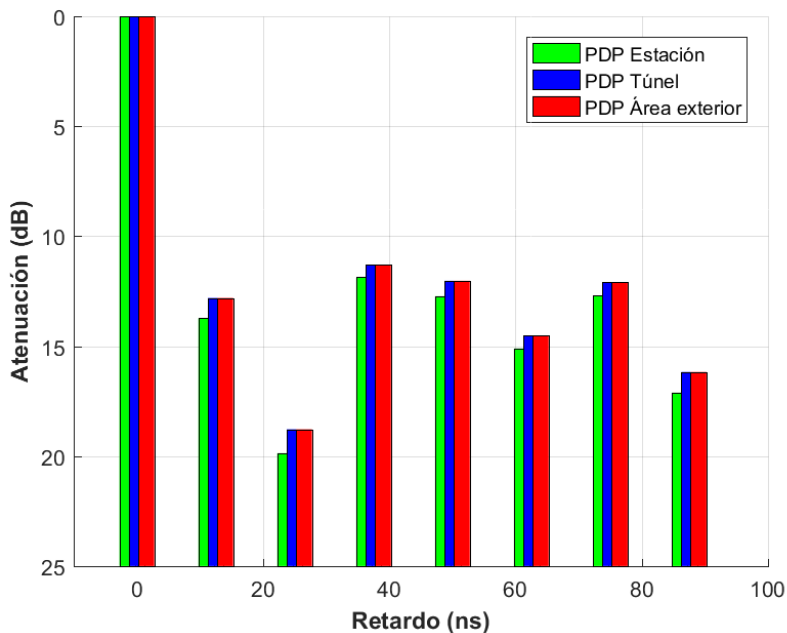


**Figura 4.11:** Comparación entre los perfiles de retardo en los diferentes sub-escenarios.

Los datos más representativos de las medidas son los indicados en la Tabla 5 donde se ve cómo el ancho del retardo cuadrático medio y el máximo retardo de cada uno de los PDP son prácticamente el mismo en todos los casos.

Con estos datos, se ha obtenido un modelo de perfil de retardo como el que aparece en la Figura 4.12 con sus correspondientes amplitudes relativas a la componente LoS en la Tabla 7. Se ha elegido un modelo de 8 taps con separación de 12,5 ns entre ellos, de manera que queden mejor representados los dos rayos predominantes de multirayecto.

Los resultados entre los distintos sub-escenarios son muy similares en banda ancha. Esto se debe a que los objetos que hay alrededor de la antena crean un *semientorno* que aísla a la



**Figura 4.12:** Modelo de perfil de retardo de potencia.

señal de los sub-escenarios tratados. Si observamos de nuevo la Figura 4.4, se ve cómo la rejilla de los laterales y cómo hay varios objetos metálicos a su alrededor sobre los que deben producirse las reflexiones más importantes.

## 4.5 Conclusiones de las comunicaciones inalámbrica en los subsistemas del tren

Se ha caracterizado un enlace inalámbrico en el tren para señales 2,6 GHz para tres entornos de metro (túnel, estación y campo abierto) a través de mediciones empíricas realizadas en una campaña de medidas que abarca enlaces entre vagones, enlace exterior-exterior del tren, interior-interior y a lo largo del tren.

Los resultados en banda estrecha destacan cómo la propagación en el interior de los trenes depende significativamente de su estructura, mostrando una atenuación considerable, especialmente en los trenes continuos debido a sus características de diseño. Además, se observa que la propagación en el enlace exterior-exterior está influenciada por el subentorno del techo, con valores de atenuación similares en los diferentes entornos de estación, túnel y aire libre. Por otro lado, el enlace exterior-interior mostró una mayor variabilidad en los subentornos, con una señal más constante en áreas exteriores y túneles, mientras que en estaciones la señal es más dispersa.

Los resultados de banda ancha indican que la dispersión del retardo es similar en todos los entornos, sugiriendo que las reflexiones de las estructuras metálicas del tren son la principal influencia en los enlaces inalámbricos, con ligeras diferencias en los tiempos de retardo.



# Capítulo 5

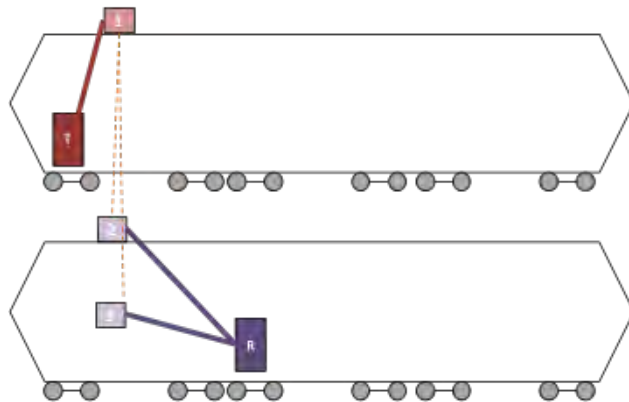
## Comunicaciones Tren a Tren

Uno de los problemas de las comunicaciones entre trenes son las interferencias cuando dos trenes se cruzan. Para evaluar este efecto indeseado, es necesario realizar un modelo de propagación que modele el canal de propagación cuando dos trenes se cruzan.

Para calcular la señal que recibe un tren del otro tanto en el exterior como en el interior de los trenes se han realizado experimentos que reproducen esta situación. De modo que el objetivo de este capítulo es mostrar la interferencia que producen las comunicaciones de un tren a otro cuando se encuentran circulando por las vías de manera habitual.

### 5.1 Escenario de pruebas

La Figura 5.1 muestra el escenario de medidas utilizado. Se observa cómo el transmisor es colocado en uno de los trenes con la antena en la cubierta del tren; mientras, en el otro tren, se coloca el receptor con una antena dentro del vagón y otra antena en la cubierta. Para realizar las medidas, uno de los trenes se mantiene parado mientras el otro se acerca a una velocidad de 3 km/h. Se ha elegido esta velocidad para tomar suficientes muestras.



**Figura 5.1:** Esquema de medida T2T

Dado que el propósito de estas medidas es ver cuál es la interferencia que produce un tren

sobre otro, las medidas sólo han sido realizadas en banda estrecha según los parámetros de transmisión especificados en la configuración de medidas descrita en la Sección 4.1.

## 5.2 Resultados de pruebas

La Figura 5.2 presenta la señal que reciben las antenas receptoras de una transmisión realizada en otro tren. El eje horizontal muestra la distancia a la que se encuentran dichas antenas, donde el 0 muestra cuando las antenas están en paralelo, el eje negativo cuando el tren se acerca y el eje positivo cuando el tren se aleja. El eje vertical indica la atenuación del enlace en referencia a la mínima atenuación que se sufre en una estación.

La configuración del escenario es la misma que la presentada en 4.1.1 con el fin de mostrar resultados consistentes a lo largo de este estudio. En resumen, esta configuración consiste la realización de mediciones de banda estrecha en el Metro de Madrid utilizando un sistema compuesto por un generador de señal Rohde&Schwarz SMA 100A como transmisor y un receptor USRP 2100 de National Instruments, configurado a una frecuencia central de 2,6 GHz con un ancho de banda de 100 MHz y una potencia máxima de salida de 42 dBm. El transmisor empleó una antena monopolo de banda ancha, mientras que el receptor utilizó un array de seis antenas directivas que registraron la señal recibida a 100 muestras por segundo, incluyendo ángulos de llegada y respuesta al impulso en diferentes direcciones. Estas pruebas se llevaron a cabo mientras un tren circulaba a una velocidad constante de 4 km/h, evaluando túneles, estaciones y campo abierto, representativos de los entornos de propagación seleccionados.

### 5.2.1 Modelo de interferencias en banda estrecha y desvanecimientos lentos

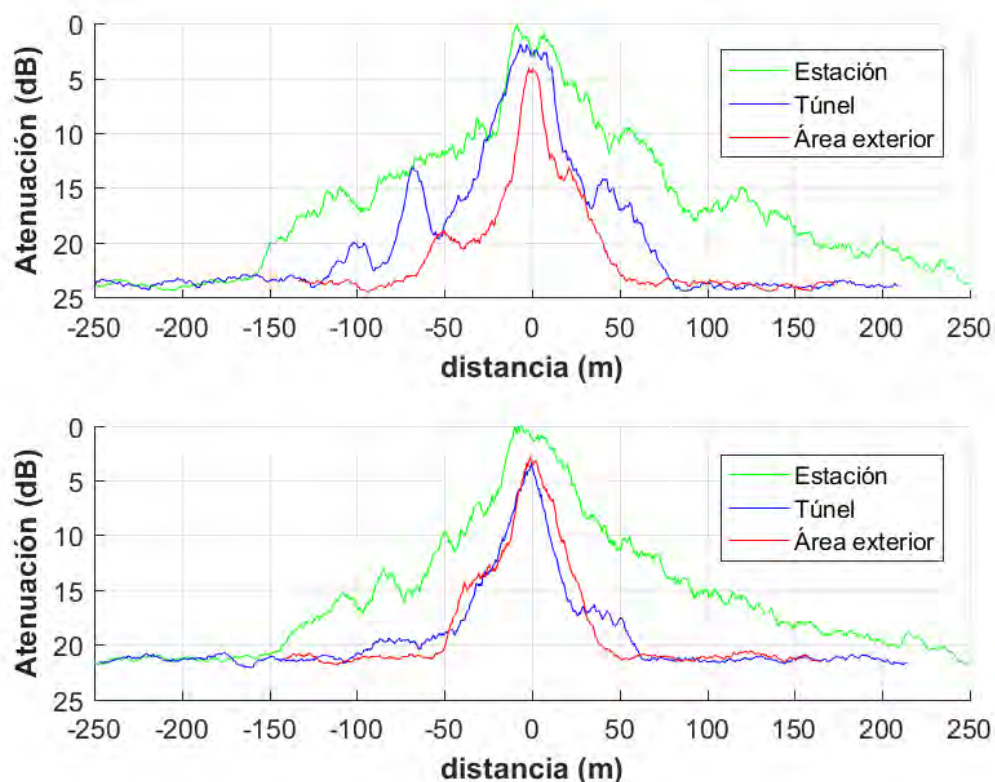
Según los resultados obtenidos en la Figura 5.2, la influencia de tren sobre otro varía claramente según el sub-escenario en el que se encuentren los trenes.

En primer lugar, hay un mayor nivel de la señal del tren interferente en las estaciones, frente a una influencia evidentemente más baja en túneles y áreas exteriores. En segundo lugar, se observa que, del mismo modo, un tren situado en una estación recibe la señal del otro desde una distancia sustancialmente mayor.

Según los valores reflejados en la Tabla 5.4, excepto en la estación, las antenas interiores reciben una potencia de señal muy similar; sin embargo, en las antenas exteriores hay una diferencia mayor entre sub-escenarios. Como era de esperar, en la estación es donde se recibe la mayor potencia y en el área exterior, por sus propias características, hay una atenuación mayor.

En las siguientes gráficas de la Figura 5.3, se presentan los resultados del modelo de pérdidas del camino en los distintos sub-escenarios cuyos parámetros se enumeran en la Tabla 5.3.

Se observa cómo el área exterior tiene un exponente de pérdidas con una diferencia de 0,1 con respecto al exponente de pérdidas del espacio libre, lo cual es un valor despreciable. En el caso del túnel, su exponente de pérdidas es menor que el de área abierta, dado que, como se ha estudiado extensivamente en el Capítulo 3, tiene un comportamiento similar a una guía-onda.



**Figura 5.2:** Comparación entre todos los sub-escenarios para antenas exteriores y la inferior, para interiores

Por último, el entorno que menos se ve afectado por la distancia es la estación.

Los resultados muestran a través de los modelos de pérdidas del camino que cuando un tren está situado en una estación, es interferido por otro tren desde más del doble de distancia que cuando se encuentra en un área exterior.

$$A \text{ (dB)} = p_1 \cdot 10 \cdot \log(d \text{ m}) + p_2 \quad (5.1)$$

**Tabla 5.1:** Comparación del modelo de pérdidas del camino en comunicaciones tren a tren

Sub-Escenario	Pendiente de pérdidas	Atenuación de referencia a 1 m	Desviación típica (dB)
Estación	$p_1 = 1,4$	$p_2 = 47,9$	8,7857
Túnel	$p_1 = 1,6$	$p_2 = 56,8$	4,6858
Área exterior	$p_1 = 2,1$	$p_2 = 59,9$	3,4388

**Tabla 5.3:** Parámetros de pérdidas del camino de acuerdo a Ecuación 5.1

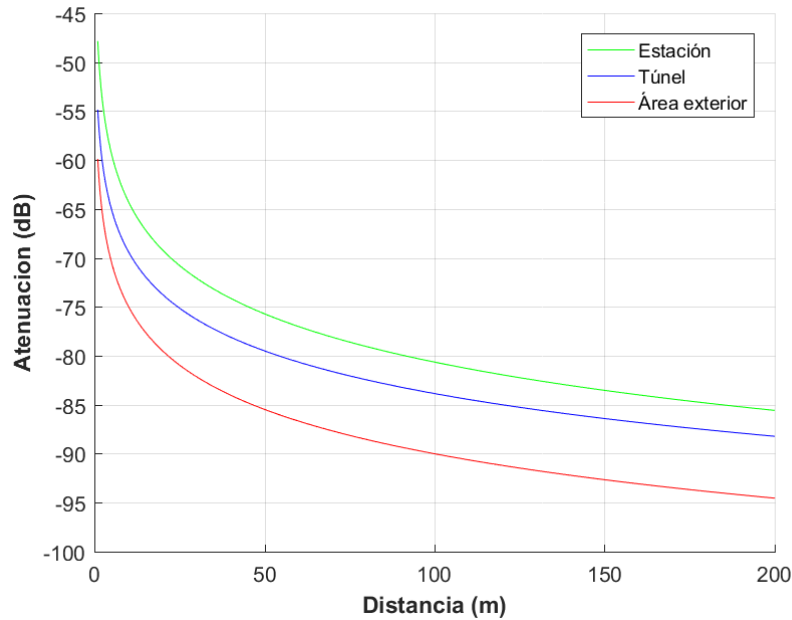


Figura 5.3: Representación de las pérdidas del camino de los tren sub-escenarios.

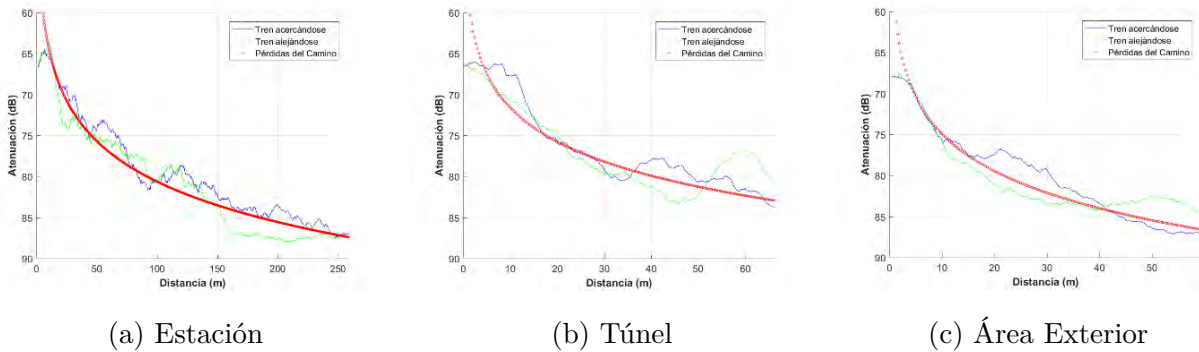


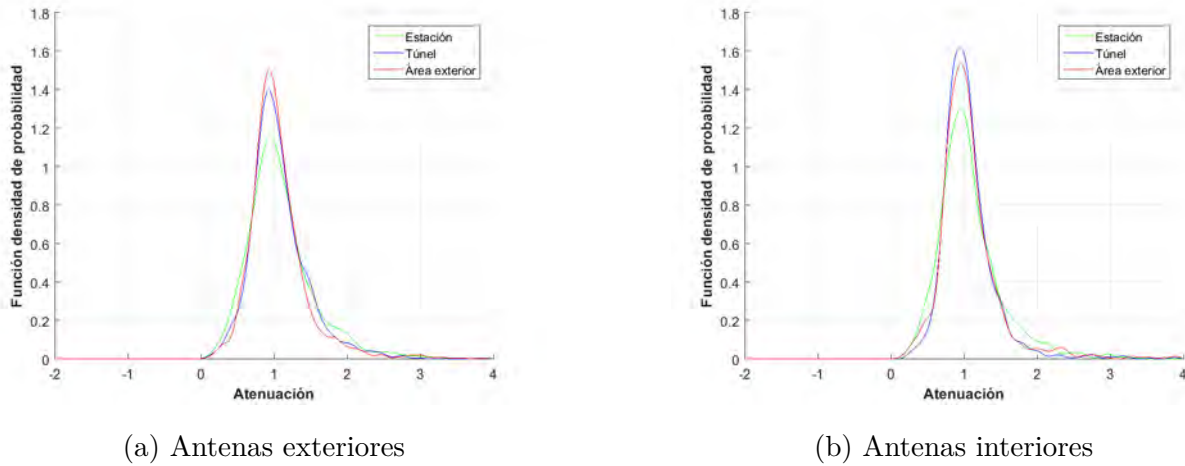
Figura 5.4: Comparación entre pérdidas del camino en comunicaciones tren a tren

### 5.2.2 Desvanecimientos rápidos

En lo referido a los desvanecimientos rápidos, no hay importantes diferencias entre sí. Lo más destacable es lo similar que es el comportamiento entre un túnel y el área exterior. No obstante, para la antena exterior, el factor  $K$  en el túnel evidencia una mayor diferencia entre la componente de rayo directo y las componentes multitrayecto.

## 5.3 Conclusiones sobre las comunicaciones Tren a Tren

El estudio de las interferencias en las comunicaciones entre trenes muestra un modelo de pérdidas del camino según el entorno en el que se halla el tren. El estudio muestra cómo es el efecto interferencia entre dos trenes que se cruzan en una operación normal.



**Figura 5.5:** Funciones densidad de probabilidad para tren a tren de las antenas

Sub-escenario	Antenas exteriores		Antenas interiores	
	Desviación típica	K (dB)	Desviación típica	K (dB)
Estación	0,3608	10,8301	0,3140	12,3371
Túnel	0,2938	12,9242	0,2544	14,2369
Área exterior	0,2674	13,7965	0,2655	14,0057

**Tabla 5.4:** Comparación de parámetros de modelado de desvanecimientos rápidos entre sub-escenario y topología de antenas en tren a tren

Los resultados muestran la influencia de la señal varía según el entorno: en las estaciones, la señal es más fuerte, mientras que en las áreas exteriores hay una mayor atenuación debido a las características del entorno. En los túneles, el comportamiento es similar al de una guía de onda, con menores pérdidas a distancias más largas. Las antenas interiores muestran una señal más constante, a diferencia de las antenas exteriores, que presentan mayores diferencias en la potencia de señal entre sub-escenarios. Además, en los túneles, se observan desvanecimientos rápidos más pronunciados, destacando la mayor diferencia entre la señal directa y las reflexiones.



## Capítulo 6

# Aplicación de las comunicaciones 5G basadas en MNOs para servicios críticos de señalización ferroviaria

En este capítulo se evalúa la viabilidad de implantar redes públicas 4G/5G para transmitir servicios críticos de señalización ferroviaria. La metodología se basa principalmente en mediciones para establecer una caracterización realista de los parámetros de comunicación de los sistemas de señalización ferroviaria cuando se introducen redes MNO. En particular, el enfoque incluye tres escenarios: en primer lugar, un enclavamiento (IXL, de sus siglas en inglés *interlocking*) y un controlador de objetos (ObjC) se interconectan mediante un prototipo desarrollado a tal efecto; en segundo lugar, el tráfico de señalización resultante se simula en un laboratorio de telecomunicaciones; por último, se realizan mediciones de campo para evaluar el comportamiento en un entorno ferroviario real. El objetivo es obtener datos suficientes para definir los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI, de sus siglas en inglés *Key Performance Indicator*) de radio y de red para proporcionar un servicio adecuado a los sistemas de señalización ferroviaria. Para lograr este objetivo, se ha desarrollado el prototipo para recoger información desde la perspectiva de la pila de protocolos, estando conectado a una maqueta de equipo de señalización.

Los objetivos de este estudio se alinean con los del FRMCS, ya que este sistema busca integrar redes de comunicación modernas como 4G/5G para soportar servicios críticos en el entorno ferroviario. El MNOs es un enfoque clave en la transición hacia el FRMCS, permitiendo una infraestructura más flexible y escalable para servicios esenciales como la señalización ferroviaria. El enfoque para el desarrollo del prototipo presentado en este capítulo se adapta a los esfuerzos necesarios para garantizar la compatibilidad técnica y operativa entre las tecnologías actuales y las nuevas arquitecturas planteadas por el FRMCS gracias a su enfoque de captura de datos desde la perspectiva de la pila de protocolos.

## 6.1 Metodología y diseño de la red

Esta sección presenta la metodología seguida en este estudio, incluidos los requisitos del sistema de señalización y la perspectiva desde la pila de protocolos.

### 6.1.1 Requerimientos de los sistemas de señalización para los sistemas de telecomunicaciones

Conceptualmente, los sistemas de señalización en vía están ubicados en un lugar fijo, generalmente desplegados en salas técnicas de las estaciones principales, que habitualmente se encuentran cercanas a áreas urbanas. Estas áreas urbanas son donde los Operadores Públicos de Telefonía (MNO, de sus siglas en inglés *Mobile Network Operators*) centran el despliegue de redes móviles.

Los equipos de señalización transmiten mensajes entre sí encapsulados en segmentos UDP/IP para ser transmitidos a través de las redes de telecomunicaciones desplegadas para tal fin.

Debido a que estos mensajes son considerados críticos para la seguridad, actualmente los sistemas de telecomunicación se componen de redes redundadas de fibra óptica basadas en redes privadas dedicadas para la transmisión de estos mensajes junto con otros servicios críticos para la operación. Estos sistemas son altamente robustos y resilientes contra fallos dado que se diseñan en caminos físicos separados para la fibra óptica, redundancia de equipos completamente independientes y las redes están diseñadas para segregarse el tráfico según el servicio que transportan, los cuales son transmitidos por paquetes de manera duplicada a los distintos equipos conectados a esta infraestructura.

No obstante, el despliegue de estas redes tiene un coste sumamente alto y sus capacidades están sobradamente infrautilizadas. Este coste aún tiene mayor protagonismo en los casos de redes de baja densidad de tráfico ferroviario, donde se instalan sistemas de señalización más sencillos y, al haber menos tráfico ferroviario, también se traduce en un menor tráfico de datos, así como una complejidad más baja. Por tanto, en términos prácticos, se pueden encontrar redes de longitudes de centenas de kilómetros para la comunicación entre unas unidades de estaciones.

Por lo tanto, para analizar la viabilidad de la propuesta de este estudio, es necesario medir un conjunto de KPIs que verifiquen cómo las redes MNO pueden afectar la velocidad de bits, la latencia y el jitter, considerando los tiempos de respuesta y los tiempos de espera de la capa física y de la capa de aplicación requeridos por el equipo de señalización. La Tabla 6.1 muestra los requisitos de comunicación para este sistema de señalización.

Al observar los parámetros enumerados en la Tabla 6.1, se concluye en que hay muy poca información sobre los requisitos para cumplir con un rendimiento de comunicación adecuado para los sistemas de señalización. Estos datos inespecíficos responden a un contexto donde actualmente se hace un despliegue de sistemas de telecomunicaciones que resultan infrautilizados y que cumplen sobradamente con las necesidades de los servicios de señalización. Por esta razón, se incluye como parte de este estudio una caracterización completa de la comunicación.

No obstante, los datos preliminares muestran una clara limitación de los sistemas de señali-

Requisitos de comunicación para equipos de señalización	Valor
Protocolo de comunicación extremo	UDP/IP
Tiempo de espera de recepción de mensajes	1.8 s
Periodo de envío de mensajes	300 ms
Velocidad de bits de señalización	4 kbps
Disponibilidad	>99 %

**Tabla 6.1:** Requisitos de comunicación para equipos de señalización ferroviaria.

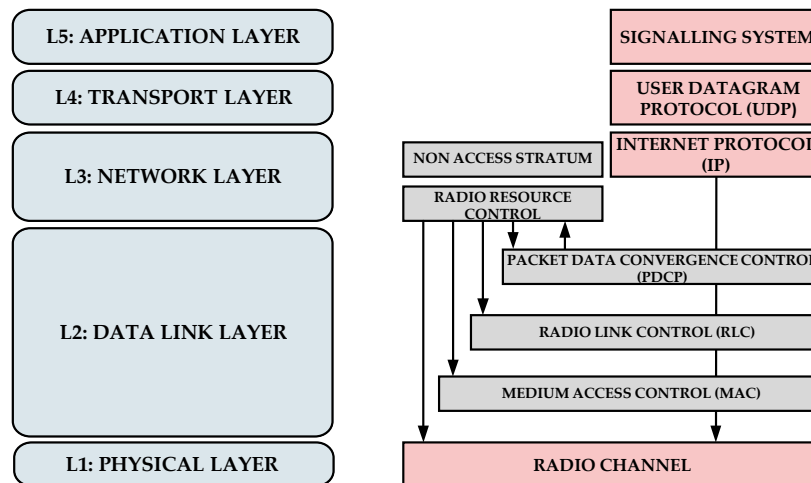
zación en términos de latencia y el período, siendo la velocidad de datos menos crítica, ya que 4G y 5G pueden proporcionar una velocidad de datos mucho mayor.

Específicamente, el parámetro de tiempo de espera de recepción de mensajes describe que el tiempo máximo permitido para enviar una orden, ejecutarla y notificar al IXL puede ser de 1,8 s, lo que puede estar condicionado por el tiempo de ida y vuelta de la red. Es importante señalar que este parámetro involucra elementos mecánicos en las vías como parte de la tarea, como por ejemplo, mover un punto ferroviario en la vía.

En cuanto al *jitter*, este está condicionado por el momento del período de envío del mensaje. Al tratarse de un protocolo de comunicación UDP, una fluctuación superior a 300 ms provocaría un notable desorden en el mensaje, y se consideraría un mensaje perdido. Además, la tasa de bits teórica generada por la comunicación entre dispositivos de señalización es de 4 kbps.

### 6.1.2 Perspectiva de la pila de protocolos

La Figura 6.1 muestra la pila de protocolos estándar seguida en este estudio para verificar los requisitos en la Tabla 6.1, en la cual las capas marcadas en rojo claro son los datos a medir en la comunicación entre el IXL y el controlador de objetos.



**Figura 6.1:** Enfoque de diseño y prueba de pila de protocolos.

En la capa física es necesario capturar parámetros que indiquen la calidad de la comunicación

a nivel de radio para ver la correlación con los datos en las capas de red y aplicación. Los parámetros para el análisis son RSRP, RSRQ y SINR.

En la capa de red, la latencia y la fluctuación determinan el ritmo de comunicación requerido por la capa de aplicación para el sistema propuesto [151]. En los sistemas de señalización se definen unos tiempos de espera para reconocer la información actualizada y reciente sobre el avance de la operación ferroviaria. Esto significa que si el sistema de comunicación no es lo suficientemente rápido, la información de la aplicación ferroviaria puede estar retrasada en la capa de aplicación, implicando un problema en la disponibilidad del sistema y, por tanto, el fallo en la elección del sistema de comunicaciones.

## 6.2 Arquitectura y configuración del prototipo

Esta sección presenta la arquitectura del *hardware* utilizado para implementar el prototipo, el software desarrollado y la configuración de medición propuesta en este estudio.

### 6.2.1 Arquitectura del prototipo

Actualmente, no se encuentran herramientas comerciales disponibles para medir y analizar el comportamiento general de los sistemas de señalización que utilizan redes móviles 4G/5G debido a que los intereses de las empresas apenas comienzan a aparecer en este ámbito de investigación para el sector ferroviario. En este estudio, el objetivo es principalmente medir el tráfico generado entre un IXL y un controlador de objetos con suficiente detalle para definir los parámetros de radio y red necesarios para proporcionar un servicio confiable a los sistemas de señalización. Por esta razón, este estudio presenta un prototipo desarrollado para este propósito, que mide y procesa los KPI desde la perspectiva de la pila de protocolos.

La Figura 6.2 muestra el esquema arquitectónico del prototipo y los elementos a los que está conectado. Siguiendo la Figura 6.1, la capa inferior representa la red MNO; la parte superior representa el equipo de señalización como capa de aplicación; y, en el medio, el prototipo se conecta al MNO y al equipo de señalización como alternativa a la red de fibra óptica actuando como capa física y de red.

El equipo de señalización consta de un controlador de objetos reales y un simulador IXL. Ambos se conectan a dos dispositivos E-Lins H900fq-W-G, que incluyen módem 4G/5G y capacidades de enrutamiento. A estos componentes se conectan elementos de medición no invasivos basados en rastreadores de tráfico y medidores de señal desarrollados para este fin.

Este prototipo nos permite hacer un análisis de los escenarios en su peor caso dado que se plantea como objetivo entender las limitaciones que proporcionaría un sistema como el propuesto en estas tesis. No obstante, los MNOs y las tecnologías 5G ofrecen servicios de mejor rendimiento que podrían proporcionar un servicio más robusto que el mostrado en este estudio. Para ello, el tipo de red MNO considerado en estos escenarios de estudio ha sido el siguiente:

- Prototipo basado en equipos comerciales como usuario habitual.

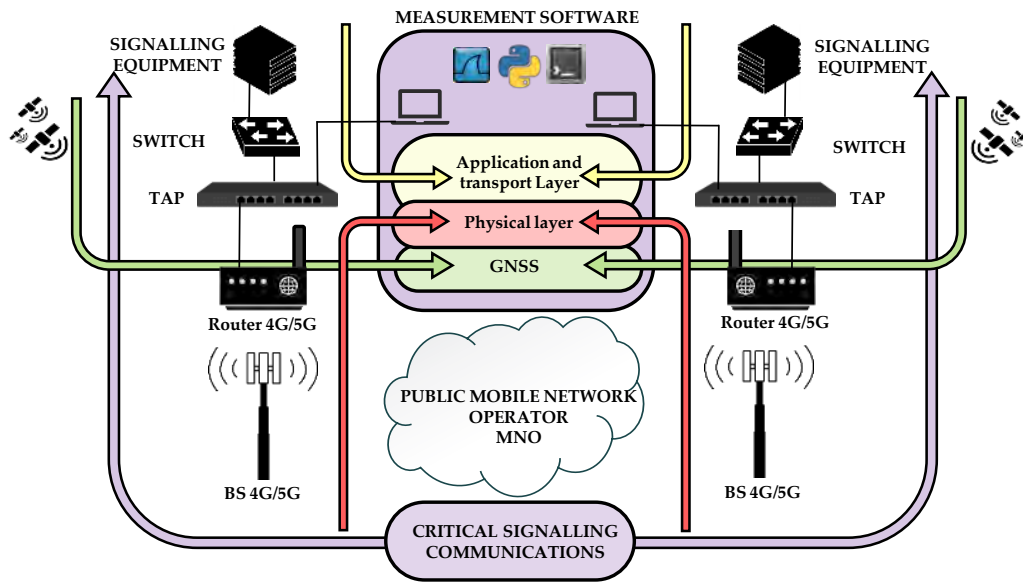


Figura 6.2: Prototipo y configuración de la arquitectura de medición.

- Prototipo basado en soluciones empresariales con un SLA [152] que garantiza, entre otros parámetros, una latencia máxima de 80 ms, una pérdida de paquetes del 0,2% y una disponibilidad mensual del 99,5%.

### 6.2.2 Arquitectura de *software*

El esquema del software se muestra en la Figura 6.3, donde las diferentes funciones se distribuyen en módulos soportados por un conjunto de tecnologías. Este software permite la captura, recopilación y post-procesamiento de las señales a nivel físico, de red y de aplicación.

Las funciones del software se definen como sigue:

- Software de medición: Esta sección se divide en tres módulos cuya finalidad es solicitar parámetros de red, capturarlos y guardarlos.
  - Módulo de solicitud de parámetros de Radio y GNSS: Desarrollado en Python. Se encarga de solicitar, en intervalos de 1 segundo, los parámetros de comunicaciones radioeléctricas y móviles y parámetros GNSS, como velocidad y coordenadas geográficas.
  - Módulo de captura de datos: usando Wireshark. La interfaz cableada captura los datos de red, transporte y aplicaciones, mientras que la interfaz Wifi captura los datos de radio y GNSS.
  - Módulo de control del software de medición: Desarrollado en programación por lotes .cmd, se encarga de sincronizar los dos módulos anteriores y guardar los datos.
- Software de procesamiento: Dividido en dos módulos cuya finalidad es transformar los datos y comprobar la calidad de la red para los servicios de señalización.

- Módulo de procesamiento de datos: Desarrollado en Python, se encarga de transformar los archivos y filtrar los archivos resultantes del software de medición a otros listos para su análisis.
- Módulo de Análisis: Desarrollado en R, se encarga de visualizar los datos y generar estadísticas para calificar la comunicación.

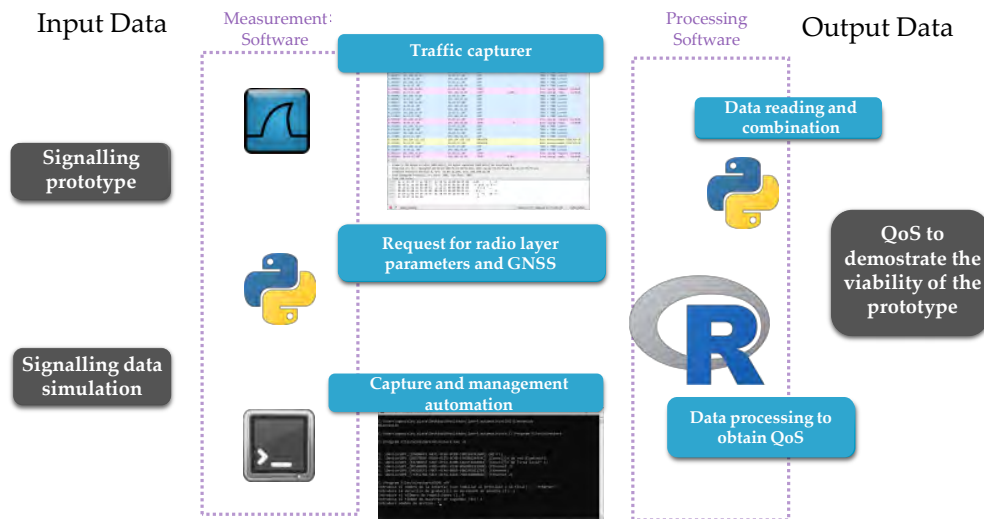


Figura 6.3: Arquitectura de módulos distribuidos por software.

## 6.3 Escenarios de medida

Esta sección presenta los diferentes escenarios en los que se ha llevado a cabo el estudio para caracterizar completamente el comportamiento de comunicación del sistema propuesto desde la perspectiva de la pila de protocolos para luego reproducir esta caracterización en un entorno ferroviario realista.

### 6.3.1 Laboratorio de señalización ferroviaria

Las pruebas utilizan una maqueta de un controlador de objetos real y un simulador IXL. Los resultados muestran la correlación entre la capa de aplicación (tiempo de respuesta de señalización y velocidad de datos) y los parámetros de red (velocidad de bits, latencia y fluctuación) de acuerdo con los requisitos del sistema de señalización definidos en la Tabla 6.1.

### 6.3.2 Laboratorio de comunicaciones

Las pruebas comparan la red de radio LTE y la 5G no-independiente (NSA). El objetivo es analizar cómo funciona el sistema en una zona con despliegue 5G, demostrando su mejora respecto a las redes 4G. Asimismo, este escenario permite una comparación entre SLA y

usuarios regulares. El motivo de la comparación de radio LTE y 5G NSA es la disponibilidad de despliegue de redes en los lugares de estudio en el momento de la realización del estudio.

Se han realizado mediciones de larga duración, en concreto 672 periodos de 15 minutos. Los datos recopilados permiten encontrar correlaciones entre los parámetros de radio y la latencia de acuerdo con los requisitos de comunicación de señalización basados en UDP.

### **6.3.3 Pruebas en campo en un entorno ferroviario**

El objetivo de las pruebas de campo es analizar el desempeño del sistema propuesto en una línea ferroviaria realista.

Esta prueba se realiza en el entorno ferroviario en una línea de baja densidad de tráfico ferroviario. La ubicación seleccionada presenta un área de baja cobertura, lo que proporciona la opción más restrictiva para probar esta implementación propuesta. Esta ubicación se encuentra entre Guardo (Plasencia, España) y Mataporquera (Cantabria, España).

El tramo ferroviario Guardo-Mataporquera es una vía única no electrificada en el norte de España sin infraestructuras de comunicación desplegadas en la actualidad. Sigue un recorrido de 65 km de longitud que incluye dos estaciones principales (las estaciones de Guardo y Mataporquera) y dos estaciones secundarias, o apeaderos, (las estaciones de Santibáñez de la Peña y Vado-Cervera).

Este entorno ha sido elegido por su idoneidad para poner a prueba este prototipo en un caso real y práctico en unas situaciones desfavorables que incluyen una orografía compleja, una zona con baja densidad de tráfico ferroviario y baja densidad de población, así como dos estaciones principales y dos apeaderos.

## **6.4 Resultados de medidas en los distintos escenarios**

Esta sección describe los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en los diferentes escenarios presentados en la Sección 6.3. El análisis se centra en la caracterización del tráfico de señalización crítico para posteriormente analizar el comportamiento de este tráfico en un entorno de laboratorio de telecomunicaciones. Finalmente, las mediciones de campo evalúan el comportamiento en un entorno real de tráfico ferroviario de baja densidad.

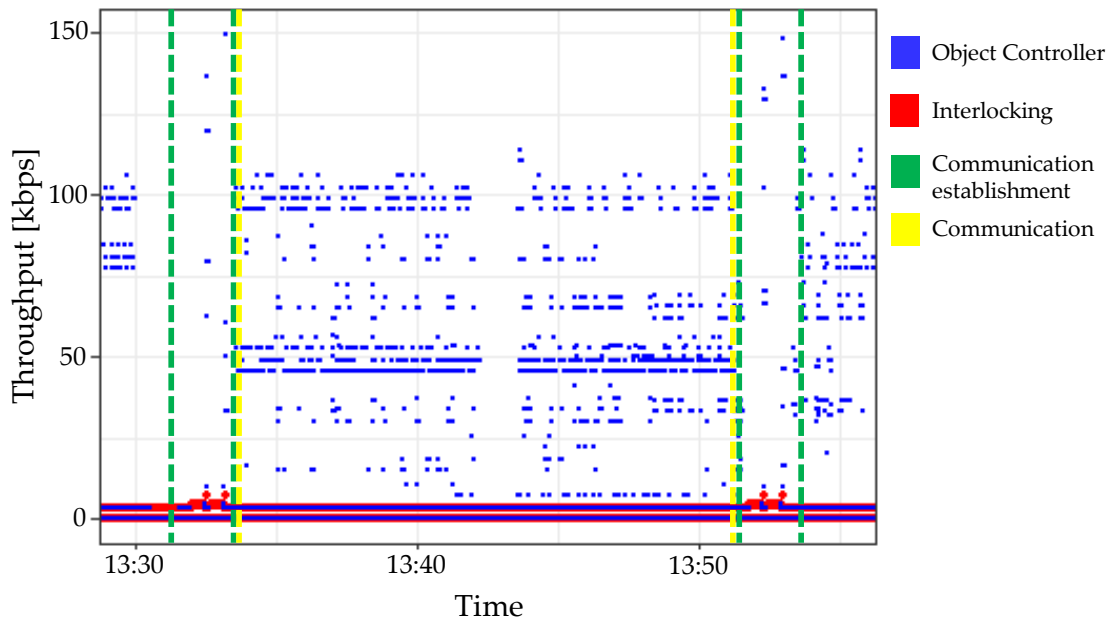
### **6.4.1 Caracterización de los parámetros de calidad de servicio para señalización**

Esta sección presenta la caracterización de los datos críticos para el sistema de señalización.

#### **Caracterización de tráfico de datos de un sistema de señalización**

La Figura 6.4 muestra la tasa de bits transmitida cuando el equipo de señalización realiza las siguientes tareas:

- Establecimiento de comunicación: proceso para establecer la comunicación en la capa de aplicación marcada entre las líneas verticales verdes.
- Tareas de señalización marcadas entre las líneas verticales amarillas:
  - Supervisión de puntos: tarea periódica para supervisar el estado de la máquina de puntos;
  - Talonado: detección de un punto entre remolques cuando pasa el tren.
- Fallo en el establecimiento de la comunicación entre equipos de señalización (a continuación, lo llamaremos fallo): el establecimiento y el progreso de la comunicación no se realizaron exitosamente a nivel de aplicación mientras se había conectado correctamente el sistema de comunicación.



**Figura 6.4:** Velocidad de bits de señalización para un conjunto de tareas.

Los resultados muestran que la tasa de bits varía según la tarea realizada. Incluyen mediciones con niveles de señal que oscilan entre  $-75$  y  $-117$  dBm en LTE a 1800 MHz. El tráfico general es de alrededor de 3,8 kbps, como se resume en la Tabla 6.2, donde la cantidad específica de datos se describe según el equipo de señalización involucrado. Hay picos de 150 kbps cuando se establece la comunicación. Además, las desconexiones de comunicación provocan la duplicación del requerimiento de tasa de bit cuando las condiciones se degradan.

### Latencia and *Jitter*

Las mediciones de latencia indican un retraso promedio en la transferencia de mensajes de 610 ms, de los cuales 70 ms se dedican al retraso de la red (ver la Figura 6.5). Esto significa que el prototipo proporciona una latencia de red reducida del 66,1 % en comparación con el sistema de comunicaciones completo. Además, como muestra la Figura 6.6 (b), la red puede

**Tabla 6.2:** KPIs de la red. Valores promedio obtenidos en la capa de aplicación, centrándose en la señalización de servicios críticos.

Parámetros	Valor Teórico	Valor Promedio Medido
<b>Tasa de Transferencia de Datos</b>		
Tasa de transferencia global	3.8 kbps	<b>Enclavamiento:</b>
Talonado		Talonado: 2.8 kbps
Supervisión		Supervisión: 3.3 kbps
Fallo		Fallo: 7.5 kbps
		<b>Controlador de Objetos:</b>
		Talonado: 2.2 kbps
		Supervisión: 4.8 kbps
		Fallo: 2.5 kbps
<b>Tiempos de Respuesta</b>		
RTT de señalización	<1800 ms	601 ms
Retardo en la red (latencia)	<500 ms	70 ms
Variabilidad de los mensajes ( <i>jitter</i> )	300 ms	318 ms

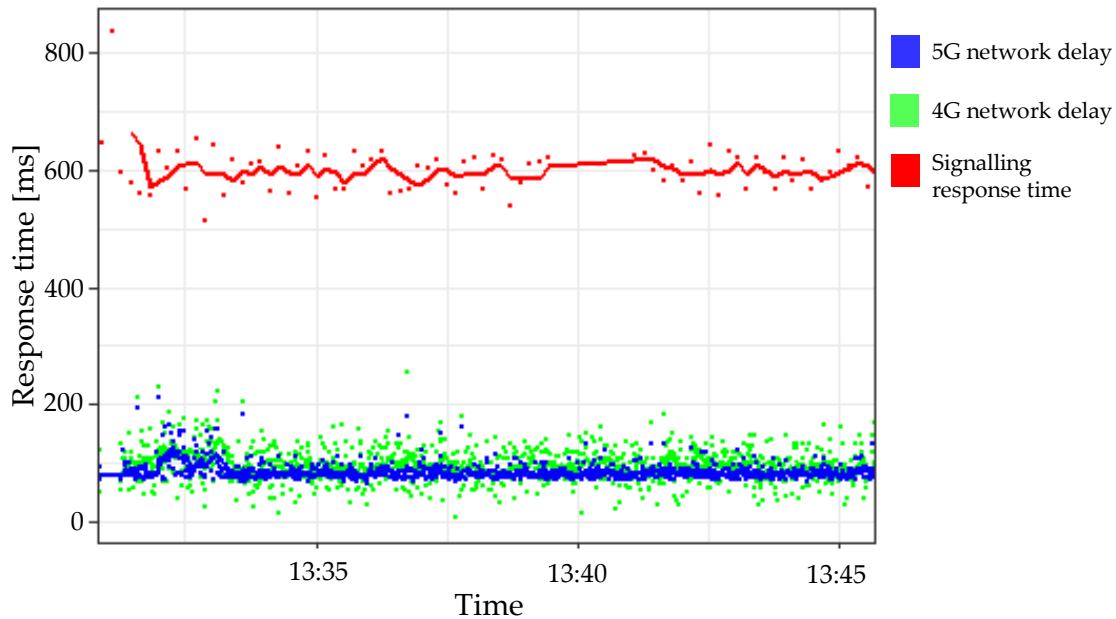
proporcionar un retraso inferior a 150 ms el 99 % del tiempo. Como resultado, el tiempo de respuesta de señalización general es inferior a 800 ms el 99 % del tiempo, como se muestra en la Figura 6.6 (c).

En términos de *jitter*, el sistema de señalización envía información cada 318 ms (periodo de comunicación) en UDP. Por esta razón, si el *jitter* de la red excede este valor, los paquetes recibidos por el equipo de señalización estarán desordenados, lo que podría causar deterioro o incluso falla en el proceso de comunicación debido a que UDP no proporciona control de congestión o confirmación de recepción. En este caso, se ha comprobado que el prototipo ofrece un *jitter* inferior a 40 ms en el 99 % de los casos, lo que indica que el margen de variación de la recepción de paquetes aún puede ser un 86,7 % superior al medido, como se muestra en la Figura 6.6. Los resultados muestran que no se encuentra ninguna muestra superior al margen en condiciones de comunicación activa.

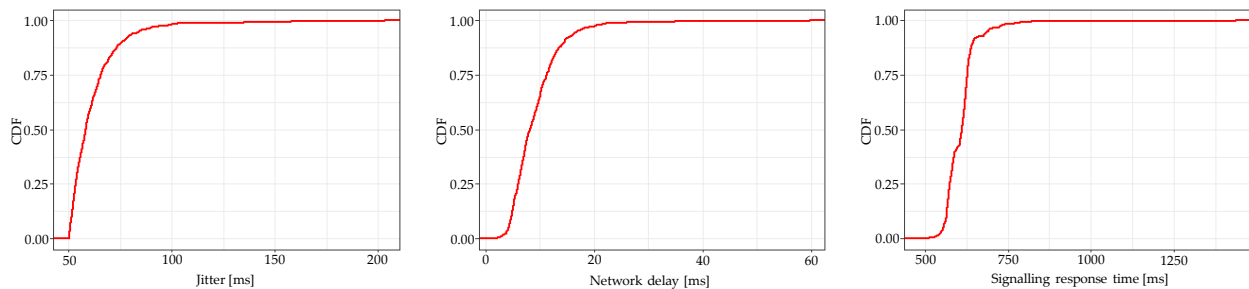
## 6.4.2 Pruebas de telecomunicaciones

Durante estas pruebas, el objetivo es evaluar el diferente comportamiento según los requerimientos del servicio de señalización. A lo largo de esta sección, las mediciones se realizan simulando datos críticos de señalización según Sección 6.4.1.

De las pruebas realizadas en el laboratorio de señalización, se deduce que el parámetro de red más restrictivo para establecer comunicaciones es la latencia, ya que el equipo de señalización



**Figura 6.5:** Señalización y tiempo de ida y vuelta (RTT, de sus siglas en inglés *Roundtrip Time*) de la red.



**Figura 6.6:** Función de densidad acumulada de los KPI de la red.

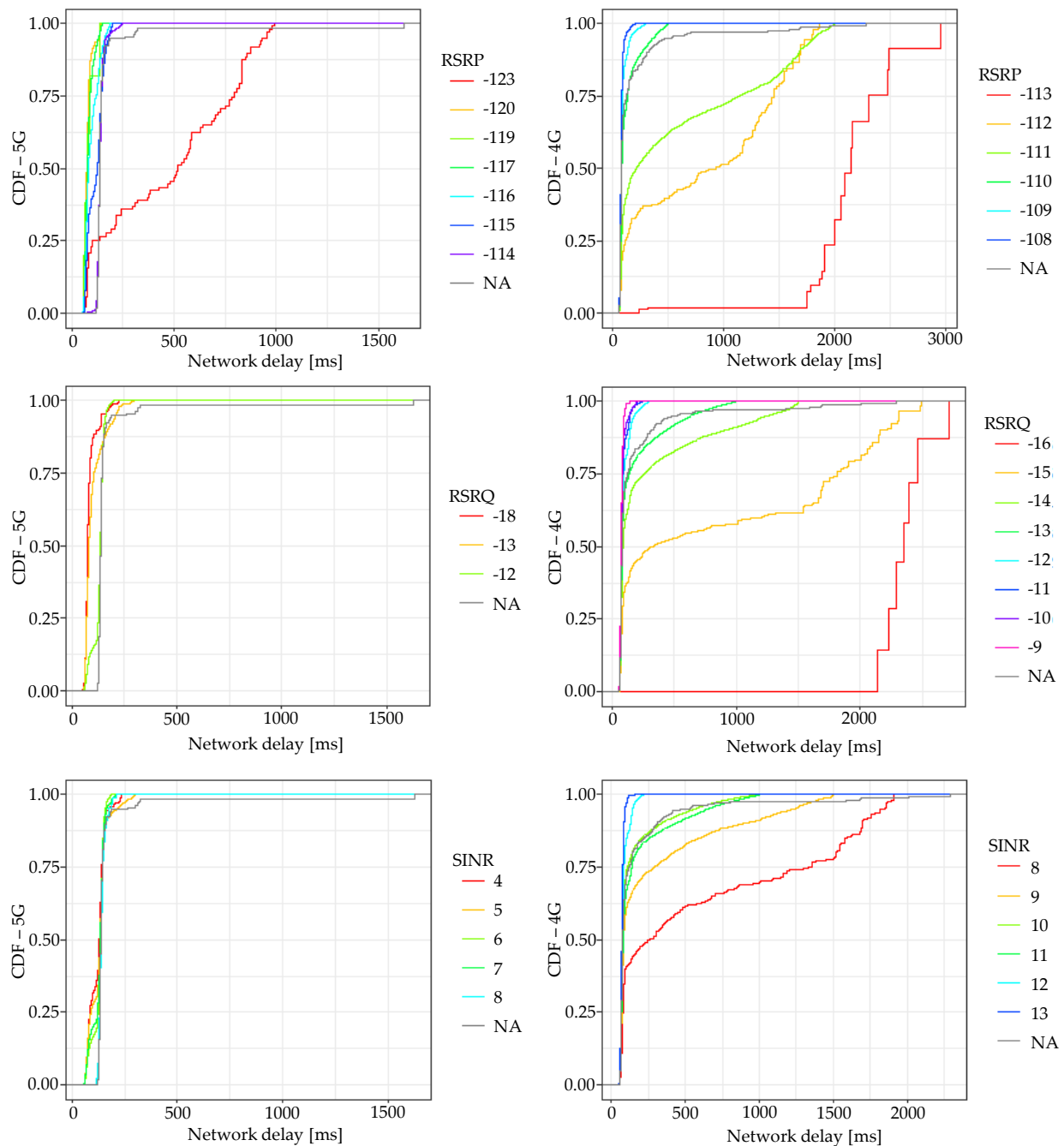
requiere un período de transferencia de mensajes inferior a 1,8 segundos en una medición de ida y vuelta, como se describe en la Tabla 6.1.

### Caracterización de las redes 4G y 5G de los MNOs

Durante estas pruebas, el objetivo es evaluar el diferente comportamiento según la prestación de servicios de los MNOs. A lo largo de esta sección, las mediciones se realizan simulando datos críticos de señalización según Sección 6.4.1.

Teniendo en cuenta los KPI en la Tabla 6.3, el tiempo máximo de ida y vuelta de la red se establece en un umbral de 500 ms (margen del 50 % sobre la brecha máxima medida de 1 s). La Figura 6.7 muestra que el RSRP será superior a  $-109$  dBm para una red 4G, mientras que el NSA de 5G permite una disminución hasta  $-120$  dBm.

Además, también queda claro cómo el sistema es más estable a medida que aumentan los



**Figura 6.7:** RSRP, RSRQ y SINR medidas de CDF para 4G (derecha) y 5G (izquierda).

niveles de señal. En términos de disponibilidad, un RSRP de  $-108$  dBm proporciona una latencia inferior a 200 ms el 99% del tiempo frente a  $-109$  dBm, que garantiza un umbral de 300 ms.

Siguiendo un razonamiento similar, RSRQ y SINR pueden bajar a  $-12$  y  $-10$  dB, respectivamente, para redes 4G. Aunque en la red 5G NSA no se han encontrado valores mínimos para estos KPI. El SINR de 4 dB proporciona un rendimiento adecuado de los datos de transmisión

**Tabla 6.3:** KPI de radio. Valores umbral de radio 4G/5G para garantizar disponibilidad el 99 % del tiempo para una latencia inferior a 500 ms.

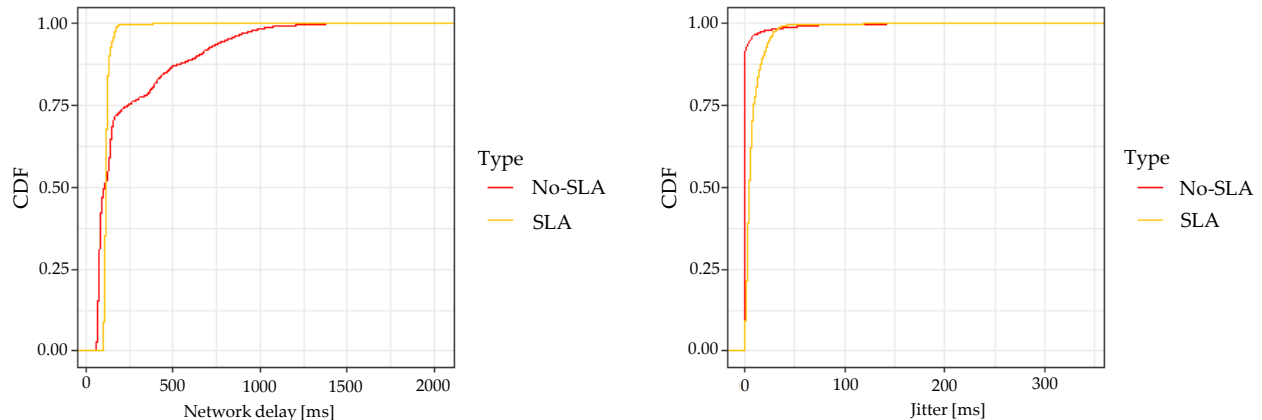
Parámetro	LTE (4G)		5G NSA	
	Radio	Latencia	Radio	Latencia
RSRP	-109 dBm	300 ms	-120 dBm	150 ms
RSRQ	-12 dB	300 ms	No se ha encontrado un valor mínimo.	
SINR	10 dB	220 ms	No se ha encontrado un valor mínimo.	

y el RSRQ puede proporcionar un servicio de calidad satisfactorio con  $-13$  dB. Este resultado muestra una mejora significativa en comparación con las redes 4G.

Este estudio muestra los valores mínimos para obtener niveles de señal suficientes para proporcionar los parámetros de red requeridos. Sin embargo, en el diseño de un proceso, se deben seleccionar valores más restrictivos para implementar un sistema robusto ante fallos.

### Comparación entre una solución de usuario habitual y con SLA

La figura 6.8 muestra la latencia considerando un contrato MNO con SLA y como usuario regular.



**Figura 6.8:** Rendimiento de la red MNO (latencia y jitter) según SLA y un usuario normal

Los resultados muestran una latencia promedio similar a lo largo de la red. Sin embargo, hay sustancialmente más estabilidad para el caso SLA. Esto se debe a que el SLA otorga prioridad sobre la red. Por lo tanto, como muestra la figura, su disponibilidad aumenta en latencia. Por el contrario, los resultados de la fluctuación son muy similares en ambos casos.

### 6.4.3 Medidas en campo en un entorno ferroviario

Para las medidas de campo en el entorno ferroviario se eligió la línea ferroviaria Guardo-Balmaseda en el segmento Guardo-Mataporquera. Entre esas estaciones se encuentran los apeaderos Santibáñez de la Peña y Vado-Cervera.

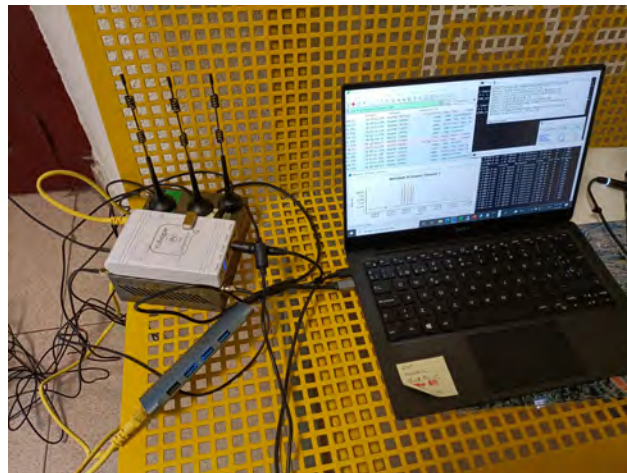
Para hacer un análisis de la línea se hizo un recorrido a lo largo de la línea haciendo uso del prototipo indicado con la ayuda adicional del equipo Qualipoc, también descrito en el Capítulo 7. El entorno de medidas y los equipos utilizados se muestran en la Figura 6.9.



(a) Estación de prueba en Guardo



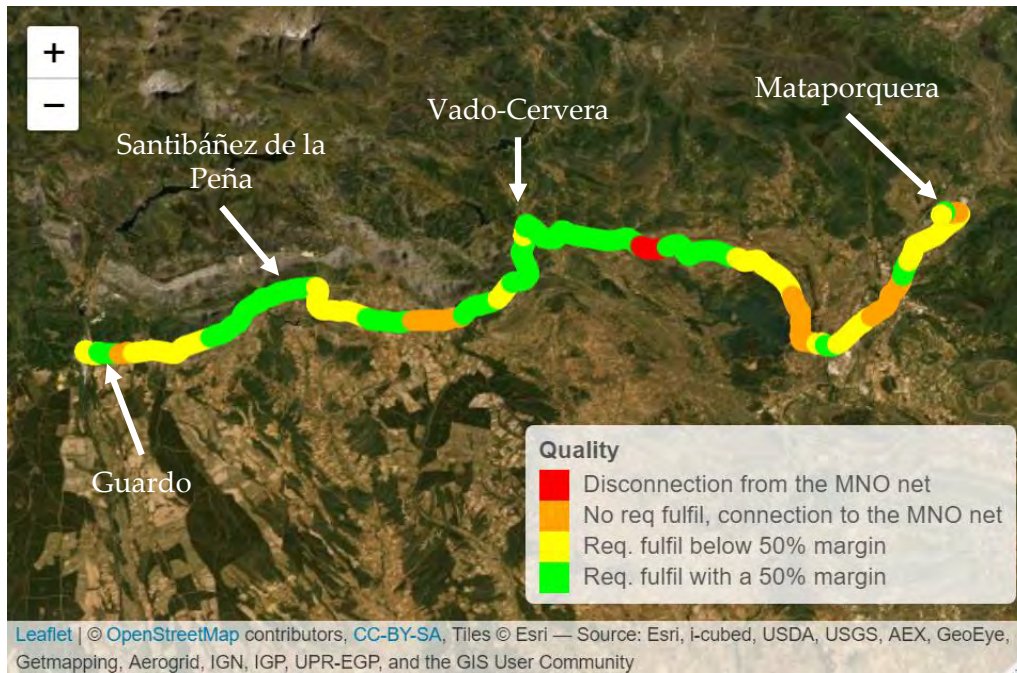
(b) Entorno de medidas



(c) Prototipo de medidas y simulador de enclavamiento ubicado en Estación de Guardo

**Figura 6.9:** Entorno de medidas en el tramo Guardo–Mataporquera de la Línea Guardo–Balmaseda

Los resultados de esta campaña de medidas se muestran en la Figura 6.10. Esta gráfica describe la prueba de KPI a lo largo del tramo Guardo–Mataporquera según los KPI de red y radio mostrados en las Tablas 6.2 y 6.3. Los colores verde y naranja muestran las áreas donde se cumplen todos estos KPI. Los primeros incluyen ubicaciones con un margen superior al 50 % de los requisitos, mientras que los segundos no necesariamente proporcionan este margen, aunque sí cumplen con los requisitos mínimos establecidos. En la figura, el color amarillo muestra las ubicaciones donde la conexión al MNO está activa (ver la Tabla 6.3) con cualquier parámetro de red no cumplido (caso de condición degradada). Finalmente, las áreas rojas no muestran ninguna conexión con los MNO, es decir, el UE estaba fuera de cobertura. Estas mediciones sólo muestran medidas de tecnología LTE ya que, en la zona de medida, no



**Figura 6.10:** Mediciones de campo en el tramo Guardo–Mataporquera de la Línea Ferroviaria Guardo–Balmaseda.

había despliegue de 5G en el momento de realización de las mediciones. Este es el caso de la mayor parte del tráfico ferroviario de baja densidad actual, mostrando resultados más realistas. Además, como se muestra en la Sección 6.4.2, el peor de los casos es para las redes 4G, ya que 5G permite parámetros de radio más restrictivos.

A pesar de haber realizado un estudio a lo largo de todo ese segmento para mostrar la situación real de una línea de ese tipo, se han tomado más muestras en las estaciones, dado que son los lugares susceptibles a tener equipos que requieren comunicaciones lejanas con el fin de obtener más muestras en los puntos más importantes de este estudio.

Los resultados muestran un buen comportamiento en toda la línea, excepto en una zona corta en una zona remota. Centrándonos en las estaciones, la tasa de éxito de los KPI aumenta para incluirse en las áreas verdes de las cuatro estaciones y sus alrededores. Esto significa que estas medidas de campo validan la hipótesis de implementar la solución propuesta en esta línea ferroviaria, ya que cumplen con los KPI de red y radio, presentando un rendimiento adicional del 50% de todos estos parámetros en las estaciones. Además, también es un resultado relevante que el MNO cubra la mayor parte del tramo ferroviario.

## 6.5 Conclusiones de las comunicaciones basadas en MNOs para servicios críticos de señalización ferroviaria

Los resultados obtenidos muestran los parámetros requeridos para asegurar una transmisión adecuada de servicios de señalización crítica haciendo uso de MNOs en redes LTE y 5G.

Se han obtenido parámetros de LTE y 5G, RSRP, RSRQ y SINR, que cumplen con los requisitos establecidos para garantizar una transmisión eficiente de los servicios de señalización crítica. Para la red LTE, el valor de RSRP fue de  $-109$  dBm, mientras que para la red 5G NSA, se registró un valor de RSRP de  $-120$  dBm, lo que indica que la señal en 5G requiere niveles más bajos de potencia para garantizar la cobertura. En cuanto al RSRQ, en la red LTE se obtuvo un valor de  $-12$  dB, mientras que para la 5G no se encontró un valor mínimo específico, lo que sugiere que la 5G podría ofrecer una mayor flexibilidad en la calidad de la señal. Además, el SINR fue de  $10$  dB en LTE, lo que asegura una buena calidad de la señal para la transmisión de datos críticos.

En términos de la red, la latencia medida en la red fue significativamente baja, con valores de  $70$  ms. Además, la variabilidad de los mensajes (*jitter*) se mantuvo dentro de los márgenes aceptables, con un *jitter* inferior a  $40$  ms el  $99\%$  del tiempo.

En cuanto a las medidas en campo, los resultados obtenidos muestran un buen rendimiento en la mayoría de la línea, con una pequeña excepción en una zona remota. Sin embargo, las estaciones mostraron una tasa de éxito significativamente mayor en cuanto a los KPI, superando en un  $50\%$  los parámetros en comparación con otras áreas de la línea.

Estos resultados muestran que las redes 4G/5G pueden proporcionar un entorno adecuado para la transmisión de servicios de señalización ferroviaria, donde tanto la calidad de la señal como la eficiencia de la red son cruciales para el rendimiento del sistema.



# Capítulo 7

## Geoposicionamiento por satélites GNSS para aplicaciones ferroviarias

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de una extensiva campaña de medidas de cobertura GPS a lo largo de las líneas ferroviarias de Renfe-FEVE en Asturias.

El objetivo es dilucidar la viabilidad de un sistema de canceladoras de tickets basado en localización GPS, uno de los servicios no-críticos descritos en la Sección 1. Para ello, se han llevado a cabo varios tipos de medidas con diferentes equipos, para posteriormente ser comparadas entre sí. Se trata de mediciones puras de GPS con una antena situada en el interior de un tren simulando la posición de una de las canceladoras, otra antena situada en el techo exterior del tren y, por último, con un equipo de medida de cobertura móvil y GNSS que incluye los sistemas de localización GPS y GLONASS.

La disponibilidad es el principal requerimiento de este sistema dado que se ha de garantizar que la zona tarifaria en la que el pasajero se encuentra se corresponde con su correcta localización; este sistema, sin embargo, no necesita una precisión milimétrica, como otras aplicaciones.

### 7.1 Información de partida

#### 7.1.1 Información sobre las líneas ferroviarias de FEVE en Asturias

Previamente a la realización de las mediciones *in situ*, se ha tomado como información de partida la ubicación de las estaciones y zonas tarifarias Renfe-Feve en Asturias, así como su ubicación geolocalizada, tal y como se muestra en la Figura 7.1

Asimismo, se han tenido en cuenta las distintas series de tren que circulan a lo largo de cada una de las líneas (ver Figura 7.2), considerando que algunas unidades presentan una estructura interior idéntica.

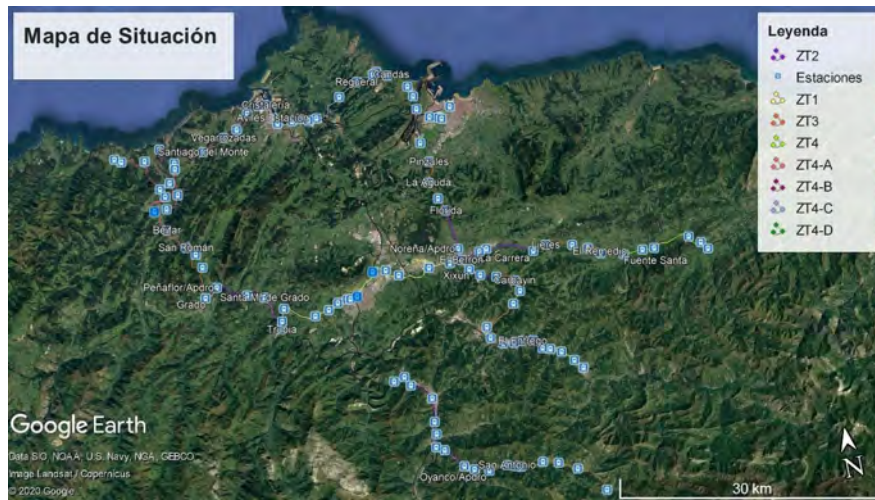


Figura 7.1: Tipos de Series en Líneas FEVE

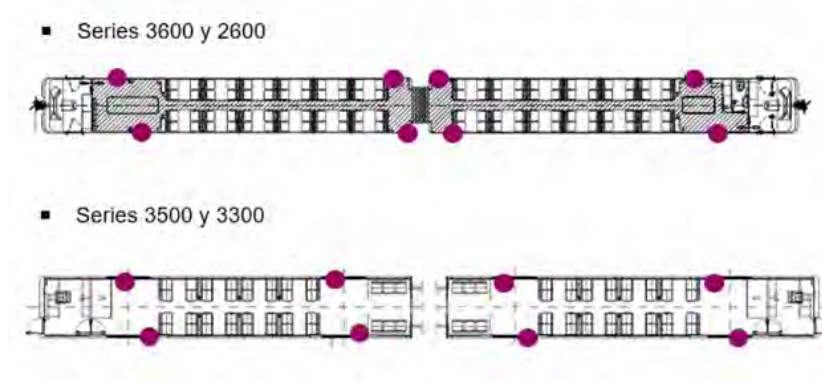


Figura 7.2: Esquema de situación

## 7.2 Equipamiento, Procesamiento De Datos y Configuración de los Escenarios de Medida

A continuación, se hace una descripción del equipamiento utilizado, los escenarios de medida y la metodología de procesamiento de datos recogidos en las campañas de medida.

Se han utilizado dos receptores Septentrio AsteRx2e para obtener la información de recepción de GPS en banda L1 y L2 con el método de corrección SBAS . Este dispositivo está específicamente creado para hacer este tipo de medidas, de manera que es capaz de capturar todos los parámetros para obtener la PVT: tracks de cada uno de los satélites, relación señal a ruido, efecto *Doppler*, multitrayecto, etcétera. Para el post-procesado de las medidas se ha utilizado un software propio de Septentrio. En estas medidas se han tomado muestras cada 1 s y 100 ms.

El equipo de medidas *Qualipoc Android Handheld*, en adelante *Qualipoc*, es una herramienta basada en teléfonos móviles Android para la evaluación de la calidad y optimización de redes de comunicaciones móviles y para localización A-GPS y GLONASS. Este dispositivo recoge,



**Figura 7.3:** Conexionado de equipos de medida

muestra y analiza información de parámetros de tecnologías móviles, así como información de la posición a través del GPS y GLONASS. Se ha utilizado un Samsung S5 modelo SM-G901F categoría 6 de LTE.

Para la realización del análisis de las medidas se ha utilizado el software de SwissQual NetQual NQView. Esta herramienta permite la visualización de los datos capturados y el post-procesado de los datos obtenidos con el QualiPoc.

Se ha utilizado este dispositivo para analizar el posicionamiento obtenido por un sistema A-GPS. Éste hace uso del GPS tradicional añadiendo un mecanismo de aceleración del proceso inicial de conexión. Este proceso inicial, denominado TTFF (*Time To First Fix*) o tiempo para la primera localización o posicionamiento, suele ser muy largo en general, del orden de incluso minutos.

Así, cuando el teléfono se enciende, envía a un servidor externo la identificación de la estación base a la que está conectado, a partir de ahí se obtiene una respuesta vía HTTP que indica los satélites a los que se debe conectar (están almacenados en el servidor externo). De esta manera, la puesta en marcha de la navegación es más rápida.

El periodo de medición de GNSS en este equipo de medidas es superior al Septentrio. Además, no es constante, como se trataba en el Septentrio, sino que varía en función de las condiciones del entorno. Cuando se tiene suficiente nivel de señal, la medida de medición es aproximadamente un (1) segundo.

Para el post-procesado de las medidas se ha utilizado el software MATLAB en su versión 2019b. MATLAB es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Proporciona funciones y herramientas



**Figura 7.4:** Dispositivo receptor Septentrio

para visualizar datos en 2D y 3D.

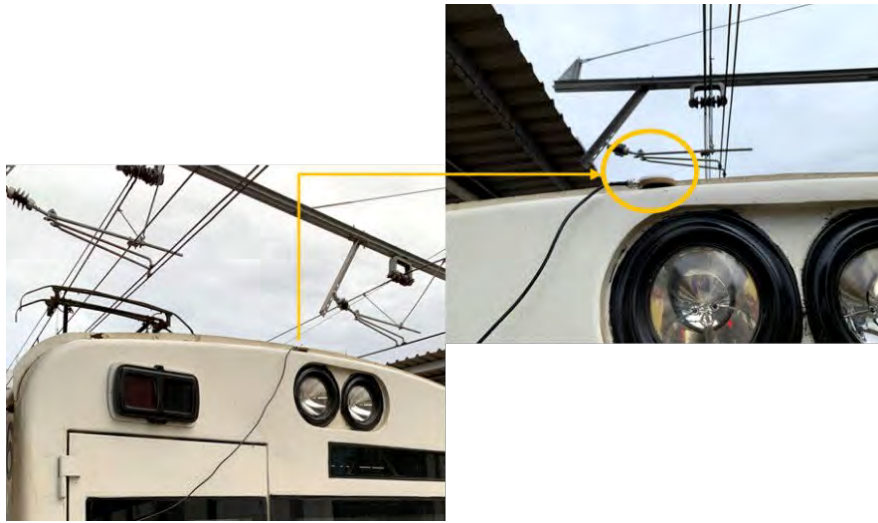
Como se comentaba previamente, el Qualipoc no es un equipo específico de medición GNSS. Su modo de funcionamiento es el siguiente: en una situación donde no obtiene un posicionamiento GNSS, Qualipoc deja de tomar medidas de posicionamiento y directamente extrapola la ubicación actual con respecto a la siguiente medida obtenida; por tanto, en estas zonas el resultado de medición no es una medida errónea, como sucede con el Septentrio.

Por ello, en el post-procesado de las medidas se ha tenido en cuenta el periodo de medición variable del equipo Qualipoc y se ha adaptado al periodo constante de medición de Septentrio para poder mostrar medidas comparativas.

En Tabla 7.1 se muestra un resumen de las características de las mediciones según el equipamiento utilizado. La configuración de estos parámetros afecta a la evaluación de los resultados, como se describe más adelante en la Sección 7.4

**Tabla 7.1:** Resumen de las características de las mediciones

	Septentrio	Qualipoc
<b>Sistema de posicionamiento</b>	GPS	A-GPS y GLONASS
<b>Periodo de muestras</b>	Constante 100 ms y 1 s	Variable $\sim$ 1 segundo
<b>Ubicación de las antenas</b>	Interior y exterior	Interior



**Figura 7.5:** Instalación de antena exterior para realización medidas GPS



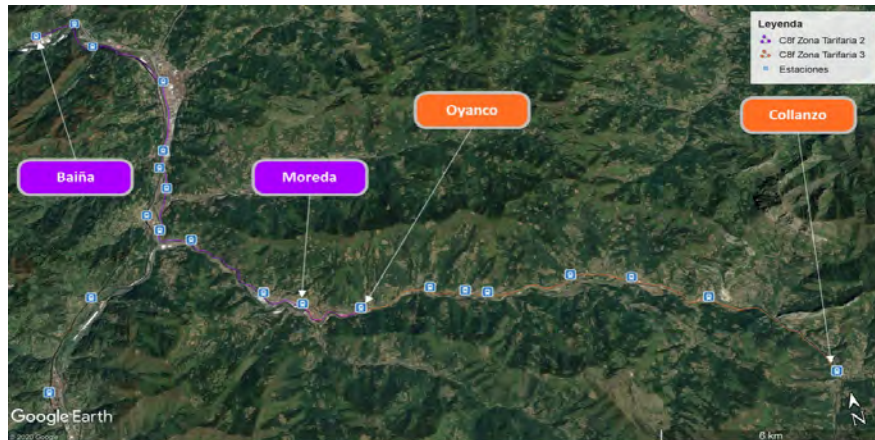
**Figura 7.6:** Instalación de antena interior para realización de medidas GPS

### 7.3 Análisis detallado de una de las líneas

En esta sección se muestran los resultados del análisis de los tres tipos de configuraciones descritas en la Sección 7.2 para una de la líneas analizadas. Se muestran estadísticas generales, parámetros de *Dilution of Precision*, número de satélites, y gráficas de la señal GPS en *Google Earth*, obtenidas en las medidas realizadas para la línea C8f de red FEVE en Asturias.

Para todos los casos, se presentan las medidas resultantes de los tres instrumentos de medida en una misma gráfica, es decir, Qualipoc, Sept. Exterior y Sept. Interior. Asimismo, para el

caso de *Google Earth*, se analizan en detalle las estaciones en las que se produce un cambio de zona tarifaria. En estas ubicaciones, se considera necesaria la recepción para que se establezca correctamente la aplicación de una u otra zona tarifaria.



**Figura 7.7:** Mapa de situación de la línea C8f



**Figura 7.8:** Perfil de elevación del terreno en la línea C8f

A lo largo de esta línea sólo discurren series de tren de motor Diesel al tratarse de una línea sin electrificar; en particular, se analizan las series 3600 y 2900.

### 7.3.1 Situación de la línea

La línea C8f transcurre entre las estaciones de Baiña y Collanzo. Como indica la Figura 7.7, en ella se encuentran dos zonas tarifarias, cuyas estaciones fronteras están en Moreda y Oyanco.

La Figura 7.8 representa el perfil de elevación aproximado de la línea C8f.

En los distintos apartados se destacan los resultados para cada zona tarifaria, haciendo hincapié en las fronteras entre éstas. Para una mejor visualización se ha incluido un código de colores para identificar las zonas tarifarias en cada uno de los resultados en color violeta y naranja.

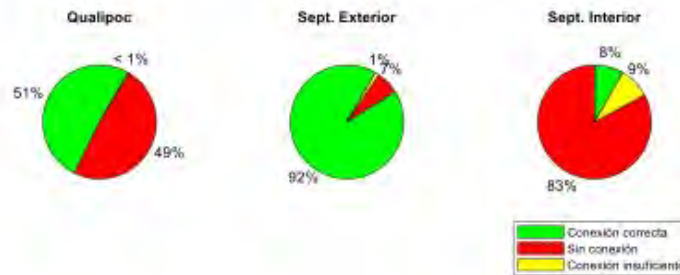
En las figuras relativas al número de satélites y HDOP se ha aplicado un factor de transparencia sobre las gráficas con el fin de facilitar la interpretación de las mismas. Se identificará de esta manera el rango de medidas correspondiente a cada zona tarifaria de forma inequívoca.

### 7.3.2 Tipo de Tren 1

A continuación, se detallan las medidas obtenidas para el tramo Baiña – Collanzo, correspondiente al tren de la serie 3600.

#### Estadísticas generales de las medidas

En Figura 7.9 se presentan las estadísticas generales obtenidas en estas mediciones. Se observa que, situando la antena en el exterior, se obtiene un porcentaje superior de medidas con conexión GPS correcta con respecto a Qualipoc y Septentrio Interior.



**Figura 7.9:** Resumen estadístico de las medidas para la serie 3600 de la línea C8f

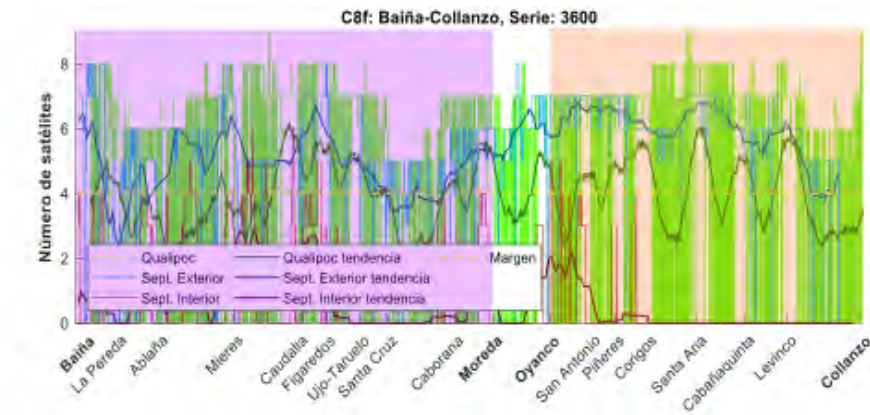
#### Número de satélites

La Figura 7.10 muestra el número de satélites captados instantáneamente a lo largo del trayecto desde Baiña hasta Collanzo. Se comprueba que hay señal a lo largo de prácticamente todo el transcurso del viaje; no obstante, se distingue que hay gran cantidad de intervalos de tiempo de corta duración en los que se pierde la señal satelital tanto para el Qualipoc como para el Septentrio con antena exterior.

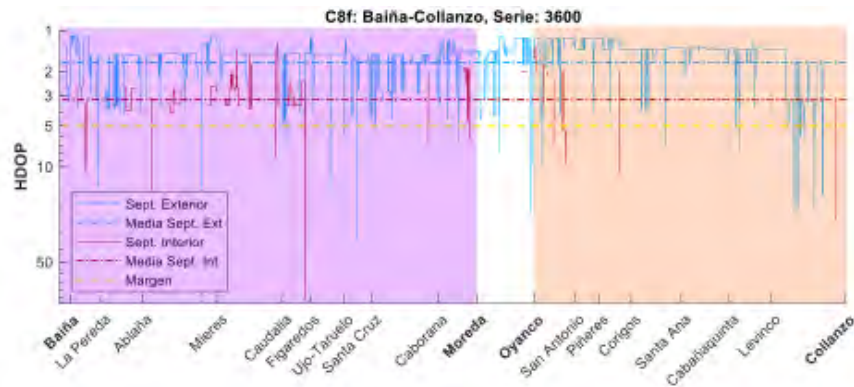
En la Figura 7.10 se muestra también la línea de tendencia que siguen las medidas capturadas por ambos instrumentos de medida. En las que podremos ver cómo en la mayor parte del tiempo ambas líneas de tendencia están por encima del margen establecido. En el caso del Qualipoc hay puntos en los que no se reciben satélites y, por tanto, el número de veces que nos quedamos por debajo del margen es mayor.

#### Horizontal dilution of precision

La Figura 7.11 muestra el parámetro de DOP horizontal en el mismo recorrido. El HDOP para Septentrio Exterior promedio es de 1.72 considerando recepción de medidas. Este valor equivale a un HDOP excelente, en un rango que nos permite elaborar decisiones precisas en prácticamente cualquier aplicación. Las medidas con Septentrio interior resultan con un HDOP medio de 3,22, valor considerado bueno.



**Figura 7.10:** Número de satélites a lo largo de las estaciones frontera de zona tarifaria para la serie 3600 de la línea C8f



**Figura 7.11:** Parámetro de Dilution of Precision en el plano horizontal para la serie 3600 de la línea C8f

### Representación gráfica de cobertura GPS en fronteras tarifarias

El cambio de zona tarifaria entre las zonas 2 y 3, se corresponde con el tramo entre las estaciones de Oyanco y Moreda, siendo ambas estaciones fronterizas. Como se puede comprobar, hay cobertura GPS en los tramos tanto anterior como posterior de ambas estaciones, pero justo en el tramo de acceso a la estación de Moreda existe ausencia de señal tanto para el Qualipoc como para el Septentrio exterior.

### 7.3.3 Serie 2900

A continuación, se detallan las medidas obtenidas para el tramo Gijón – Cudillero, correspondiente al tren de la serie 2900.

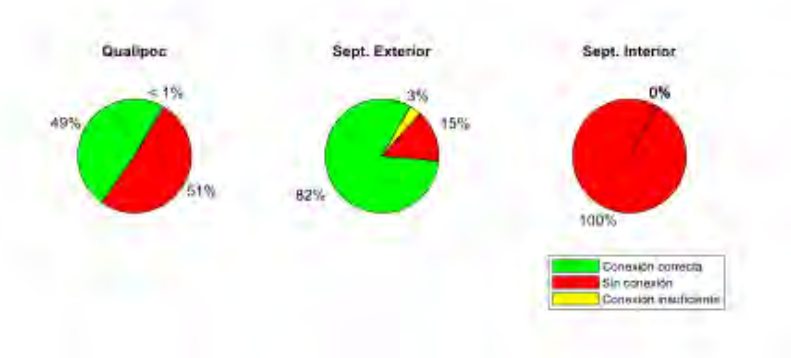
#### Estadísticas generales de las medidas

En Figura 7.13 se presentan las estadísticas generales obtenidas en estas mediciones. Se observa que, situando la antena en el exterior, se obtiene claramente un porcentaje superior de



**Figura 7.12:** Puntos fronterizos entre zonas tarifarias línea C8f (serie 3600)

medidas con conexión GPS correcta que en el caso de los dispositivos situados en el interior. A diferencia de otras medidas de Septentrio Interior, en este caso, el equipo sí llegó a sincronizar, pero no a captar satélites suficientes para calcular la localización en ninguno de los puntos.

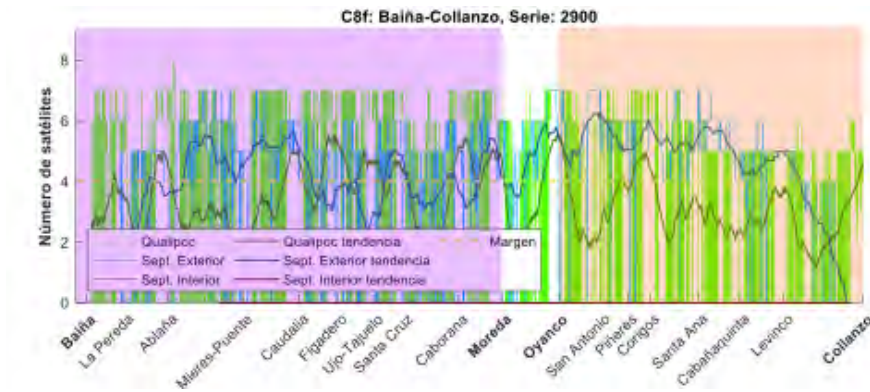


**Figura 7.13:** Resumen estadístico de las medidas para la serie 3600 de la línea C8f

### Número de satélites

La Figura 7.14 representa cómo varía la cantidad de satélites conectados a los receptores a lo largo del trayecto. En este caso, se puede comprobar cómo, por un lado, el Septentrio Exterior captura medidas a lo largo de toda la línea, al igual que Qualipoc. Este segundo equipo presenta continuas mediciones satisfactorias con cortas caídas a cero satélites; por el otro lado, Septentrio Interior, aunque superada la fase de sincronización, no obtiene medidas en ningún punto de la línea.

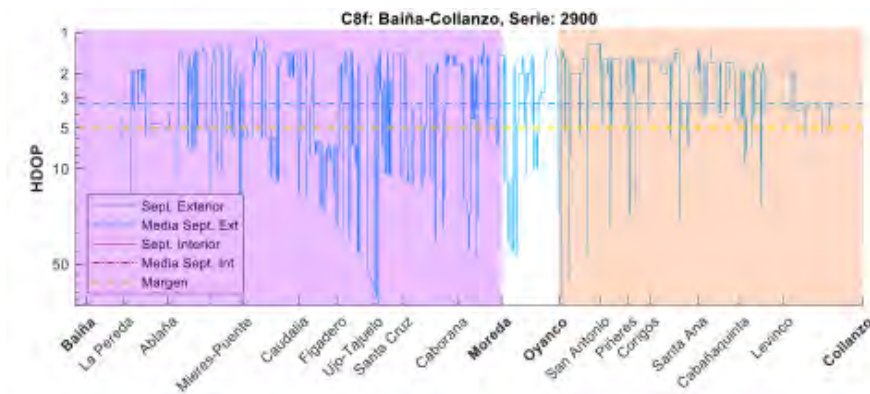
En cuanto a las líneas de tendencia se comprueba de igual manera que ocurría en la serie 3600, que el número de zonas bajo el umbral es mayor en el caso del Qualipoc que en el caso del Septentrio Exterior.



**Figura 7.14:** Número de satélites a lo largo de las estaciones frontera de zona tarifaria para la serie 2900 de la línea C8f

### Horizontal dilution of precision

La Figura 7.15 muestra los resultados obtenidos para DOP horizontal en el mismo recorrido.



**Figura 7.15:** Parámetro de Dilution of Precision en el plano horizontal para la serie 2900 de la línea C8f

Se comprueba que el valor HDOP medio cuando hay recepción de señal GPS en el exterior es 3,34, calidad, buena, la cual queda ligeramente por encima de los requisitos de HDOP que es inferior a 5.

### Representación gráfica de cobertura GPS en fronteras tarifarias

El cambio de zona tarifaria entre las zonas 2 y 3, ver Figura 7.16, se corresponde con el tramo entre las estaciones de Oyanco y Moreda, siendo ambas estaciones fronterizas. Como se puede comprobar hay cobertura GPS en los tramos tanto anterior como posterior de ambas estaciones, pero en el tramo de acceso a la estación de Moreda existe ausencia de señal tanto para el Qualipoc como para el Septentrio exterior.



Figura 7.16: Puntos fronterizos entre zonas tarifarias línea C8f (serie 2900)

### 7.3.4 Resumen de la línea

Para finalizar el análisis de la línea C8f, Tabla 7.3 muestra un resumen de los valores más destacados del estudio. Se ha indicado con un código de tres colores si hay o no recepción de señal en esos puntos: verde (correcto), amarillo (por debajo de lo deseable) y rojo (no aceptable). Asimismo, la Tabla 7.3 muestra un resumen de la señal en las estaciones fronterizas de zona tarifaria.

Tabla 7.3: Resumen combinado de parámetros y estaciones frontera

Parámetros relevantes						
Parámetros	Serie 3600			Serie 2900		
	Qualipoc	Sept. Exterior	Sept. Interior	Qualipoc	Sept. Exterior	Sept. Interior
Conexión correcta	51 %	92 %	8 %	49 %	82 %	0 %
Satélites	6,72	5,70	3,61	5,96	5,13	0
HDOP	N/A	1,72	3,22	N/A	3,34	N/A
Estaciones frontera						
Moreda (2-3)	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
Oyanco (2-3)	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No

## 7.4 Análisis general considerando todas las líneas y series de trenes

La Tabla 7.5 y Tabla 7.6 presenta un resumen de los valores promedio más representativos de las medidas realizadas. En ella se presenta el porcentaje de medidas correctas (es decir, medidas con PVT) obtenidas para cada equipo de medidas, serie de tren y línea. A continuación, de aquellas muestras en las que se ha obtenido medición, es decir o medidas correctas (con PVT) o medidas insuficientes (sin PVT), se muestra también el promedio del número de satélites medio captados, parámetro de precisión horizontal y tiempo medio entre medición captada.

**Tabla 7.5:** Resumen del porcentaje de tiempo con medidas y HDOP

Línea	Serie	% de tiempo con medidas			HDOP	
		Qualipo	Sept. Exte-rior	Sept. Inte-rior	Sept. Exte-rior	Sept. Inte-rior
Línea 1	Tren 1	47 %	71 %	-	1,85	-
	Tren 2	-	70 %	23 %	2,94	3,07
Línea 2	Tren 1	55 %	68 %	0 %	2,73	-
Línea 3	Tren 1	49 %	88 %	-	2,32	-
Línea 4	Tren 1	53 %	86 %	13 %	1,85	2,89
	Tren 2	33 %	26 %	-	2,66	-
<b>Promedio</b>		48 %	72 %	9 %	2,46	3,06

**Tabla 7.6:** Resumen del número de satélites por línea y serie

Línea	Serie	Número de satélites		
		Qualipo	Sept. Exte-rior	Sept. Inte-rior
Línea 1	Tren 1	6,48	6,60	-
	Tren 2	-	5,00	4,24
Línea 2	Tren 1	5,21	6,68	0
Línea 3	Tren 1	5,89	5,41	-
Línea 4	Tren 1	7,07	6,38	4,57
	Tren 2	5,32	4,56	-
<b>Promedio</b>		6,09	5,66	2,48

Como se observa en la tabla, las estadísticas generales de las medidas muestran cómo la

antena exterior capta un porcentaje por encima 70 % del tiempo a lo largo del recorrido de las mediciones. No es el caso del Septentrio Interior, que capta en todos los casos un porcentaje de tiempo insuficiente para llevar a cabo esta aplicación. Por último, el terminal móvil (Qualipoc) obtiene un valor de éxito (o medidas con PVT) el 48 % del tiempo, un porcentaje inferior, pero en el límite de lo aceptable. Sobre el Qualipoc, cabe destacar que este porcentaje está referido al porcentaje de tiempo que es capaz de captar muestras cada segundo con el fin de hacer una comparativa rigurosa con el resto de los equipamientos.

Cabe destacar que, en una línea ferroviaria con túneles, no podrá haber un 100 % de recepción de posicionamiento satelital y, por tanto, parte del porcentaje sin cobertura obtenido se debe a este aspecto. En cualquier caso, en nuestro estudio, los túneles no se encuentran en las estaciones de zona de cambio de tarifa y, por tanto, no es un problema a la hora de implementar este sistema.

Partiendo de estas estadísticas, se ha hecho un promedio del número de satélites y del HDOP con el fin de analizar si, cuando se capta señal, ésta tiene suficiente calidad y precisión. En primer lugar, en términos de número de satélites, se observa que tanto Septentrio Exterior como Qualipoc superan con creces el límite de cuatro satélites necesarios para una recepción satisfactoria; no es el caso de Septentrio Interior cuyo valor no supera los tres satélites. Además, teniendo en cuenta el HDOP, que nos da una visión de la geometría de los satélites captados y, por tanto, la precisión de la medición final, observamos que el valor obtenido para ambos equipos Septentrio (entre 2-5), marca un valor apropiado para tomar decisiones precisas.

Finalmente, el periodo medio entre muestras con y sin PVT indica un promedio de la tolerancia o retardo que el sistema de canceladoras tendría usando este tipo de equipamientos. En otras palabras, este valor indica una media de cómo de antiguo es el dato de posicionamiento y, por tanto, el tiempo que tarda en refrescar a una nueva posición entre captaciones de medición. En el caso de los equipamientos utilizados, se comprueba de nuevo que la tolerancia o retardo de las muestras es de un valor aceptable para tanto Qualipoc como Septentrio Exterior dado que no supera en ningún caso los dos segundos.

Es preciso matizar las características de los equipos utilizados en cuanto al periodo medio de muestras con y sin PVT. Por un lado, como se comentaba anteriormente, Qualipoc tiene un periodo de medición variable en función de si capta o no señal, y extrapola en el resto de los casos. Por el otro lado, Septentrio sí tiene predefinido un valor constante de medición, 100 ms o 1s en el caso de las medidas.

### 7.4.1 Análisis en las estaciones frontera

La Tabla 7.7 recoge la viabilidad de recibir señal y proceder a una correcta aplicación de la zona tarifaria en aquellas estaciones en que se producen cambios de zona tarifaria. Estos resultados se detallan en sus informes individuales de las correspondientes líneas.

A nivel general, prácticamente todas las estaciones frontera cuentan con nivel de señal amplio tanto para el Septentrio Exterior como para el Qualipoc; sin embargo, no ocurre lo mismo para el Septentrio Interior, donde en la mayor parte de las veces no se han recogido datos o no llegó a sincronizar el receptor.

**Tabla 7.7:** Cobertura de medidas satelitales por estación y serie de trenes

Estación	Series 3300- 3500- 2900			Serie 3600		
	Terminal móvil	Sept. Ex-terior	Sept. In-terior	Terminal móvil	Sept. Ex-terior	Sept. In-terior
Avilés	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos	Sí	Sí
Avilés Apdo.	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos	Sí	Sí
Candás	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos	Sí	Sí
Candás Apdo.	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos	Sí	Sí
Carbayín	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos		
Ciaño	Sí	No	No sinc.	Sin datos		
El Berrón	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
El Entrego	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos		
Grado	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No sinc.
La Aguda	Sin datos	Sí	No sinc.	Sin datos		
La Felguera	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos		
Lieres	Sí	Sí	No sinc.	Sí	Sí	No
Moreda	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
Nava	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
Noreña	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos		
Oyanco	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
Sama	Sí	No	No sinc.	Sin datos		
San Román	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No sinc.
San Vicente	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos		
Santiago del Monte	Sí	Sí	No sinc.	Sin datos		
Soto Udrión	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No sinc.
Trubia	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No sinc.

## 7.4.2 Consideraciones y limitaciones de las siguientes implementaciones

En este apartado se incluye un resumen comparativo en el que se analizan aspectos específicos de cada una de las mediciones realizadas.

### Terminal Qualipoc

Se incluye un análisis de las estadísticas generales obtenidas con el equipamiento Qualipoc según la tolerancia o latencia máxima impuesta al sistema. Como se explicaba anteriormente, la tolerancia está referida a lo “antigua” que una muestra de posicionamiento puede llegar a ser para que el sistema funcione con el mínimo de fallos. Este valor dependerá del sistema a implementar.

Para ello, la Tabla 7.9 muestra las estadísticas de éxito en función del límite de tiempo máximo de recepción de cada nueva localización.

**Tabla 7.9:** Porcentaje de muestras válidas para un periodo de muestreo de 1, 1,5, 2, 3, 4, 60 y 8 minutos 20 segundos en equipo terminal móvil (Qualipoc)

Línea	Serie	1 s	1,5 s	2 s	3 s	4 s	60 s	500 s
C4f	3300	22 %	47 %	47 %	48 %	61 %	91 %	96 %
	3600	-	-	-	-	-	-	-
C5f	3300	28 %	55 %	55 %	56 %	77 %	94 %	95 %
C6f	3600	23 %	49 %	49 %	50 %	66 %	94 %	94 %
C7f	3500	26 %	53 %	53 %	53 %	73 %	96 %	96 %
	3600	16 %	33 %	33 %	33 %	50 %	77 %	77 %
C8f	3600	26 %	51 %	51 %	51 %	71 %	99 %	99 %
	2900	23 %	48 %	49 %	49 %	67 %	93 %	93 %
Promedio		23 %	48 %	49 %	49 %	66 %	92 %	93 %

El estudio se ha hecho para un rango de valores donde se evidencia desde el caso más restrictivo, 1 segundo, hasta el caso de convergencia del sistema; en este caso, se ha elegido 500 segundos (8 min 20 s).

El caso más restrictivo muestra unas estadísticas que no cumplen con las necesidades de este sistema. No obstante, se trata de un dato engañoso dado que 1 segundo es el límite de medición aproximado de este equipamiento. Por ello, evaluando con un período de 1,5 s, se observa que las estadísticas no difieren prácticamente de las que se obtienen en períodos de 2 y 3 segundos. Estos datos evidencian que utilizando un sistema cuya tolerancia deba ser menor de 3 segundos, es decir, que la posición obtenida no supere una antigüedad de más de 3 segundos, el sistema puede dar resultados erróneos aproximadamente un 50 % del tiempo. No obstante, si su tolerancia es ligeramente mayor, de 4 o 5 segundos, el porcentaje de respuesta correcta es sustancialmente más alto.

Por último, el caso de convergencia del sistema muestra que, para la mayoría de las mediciones, se han obtenido muestras a lo largo de toda la línea. Centrándonos en un valor más representativo, 60 segundos, se observa que las muestras captadas por el Qualipoc están recogidas a lo largo de todo el trayecto. Es decir, en el 93 % de los casos se obtendrá una muestra al menos cada minuto.

El software incluido en la canceladora deberá ser capaz de adaptarse a estos retardos a la hora de evaluar la zona tarifaria en la que se encuentra dado que, añadiendo cierta inteligencia a este sistema, la probabilidad de fallo puede ser reducida sustancialmente. No obstante, estas probabilidades están basadas en la obtención de datos del conjunto de toda la línea. Centrando el foco en las estaciones frontera se comprueba que se obtiene recepción en prácticamente todas las estaciones.

Cabe destacar el caso particular de la línea C7f en la serie 3600 donde se comprueba que los resultados difieren del resto de las líneas, en las cuales se observan resultados similares. Este caso está detallado en su informe, donde se destaca una ubicación mejorable de los equipos y las condiciones climáticas extremas.

### Equipo Septentrio

Como se mostraba anteriormente, las medidas más satisfactorias son las realizadas con el Septentrio situando la antena en el exterior del tren. No obstante, analizando en detalle estos resultados se comprueba que las medidas realizadas para las series 3300 y 3500, cuya estructura es idéntica, son mejores que las realizadas para la serie 3600.

La Tabla 7.11 muestra un análisis numérico donde se comprueba que todos los parámetros analizados salen favorecidos para las series 3300-3500.

**Tabla 7.11:** Parámetros resumen de las series de tren

Septentrio Exterior	Series analizadas	
	3300- 3500	3600
Estadísticas éxito	75 %	69 %
Satélites	6,55	5,17
HDOP	2,89	3,08
Periodo medio de muestra con medida	0,46 s	0,65 s

El motivo de esta ligera mejora de unas series con respecto a otra puede ser la forma que tiene la estructura exterior del techo de ambos trenes. La Figura 7.17 muestra una fotografía de ambas series donde se puede ver cómo claramente al ubicar una antena en el frontal del tren, para la unidad 3600 (b) parte del azimut de la antena queda totalmente bloqueado por la propia estructura del tren.



**Figura 7.17:** Fotografías de las series de tren para ubicación de antenas en el exterior

Por tanto, al hacer una implementación de este tipo, se requiere una especial atención a la estructura y hacer un estudio de cuál sería la posición óptima con el fin de obtener las máximas muestras posibles con la mejor precisión.

Los resultados de ubicar el Septentrio en el interior del tren demuestran una recepción insuficiente para todos los casos. No obstante, se observa que, dentro de este resultado general, hay tres casos diferentes. En algunas líneas, Septentrio Interior capta algunas muestras con PVT, en otras, cero satélites a lo largo de todo el recorrido y, por último, está el caso en el que directamente no aparece medición. Este último indica que, aunque se encendió el equipamiento y se puso a medir, en ningún momento del trayecto el equipo fue capaz de llegar a la fase de sincronización de satélites, por lo que, dadas las características del equipo, consta como que no grabó en ningún momento.

## 7.5 Conclusiones del geoposicionamiento por satélites GNSS

Este análisis evalúa la disponibilidad de la cobertura GPS a lo largo de las líneas ferroviarias en zonas montañosas al norte de España. Se han considerado las siguientes configuraciones diferentes para evaluar la recepción de la señal: GPS puro tanto en el exterior como en el interior del tren, y GPS asistido y GLONASS en el interior del tren.

Los resultados obtenidos muestran que la recepción de la señal varía dependiendo de la configuración utilizada, destacando las características específicas de cada una.

La primera opción consiste en ubicar el equipo dentro del tren utilizando un dispositivo con asistencia GNSS, multiconstelación (GPS, GLONASS, Galileo, etc.) y multibanda. Esta configuración permite una señal adecuada en el interior del tren, recomendándose colocar la antena receptora cerca de las ventanas. En el caso de una configuración similar, se utilizó un terminal móvil con A-GPS y GLONASS, logrando una recepción de señal del 50 % del tiempo con una tolerancia inferior a 3 segundos y del 82 % con una tolerancia inferior a 5 segundos, además de asegurar la recepción de posicionamiento en casi todas las estaciones frontera analizadas.

La segunda alternativa consiste en colocar antenas en el exterior del tren, logrando así una recepción óptima. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del sistema en términos de disponibilidad y precisión, con estadísticas superiores al 70 % en DOP y número de satélites. Aunque en un principio se había descartado esta configuración debido a la necesidad de instalar alrededor de ocho canceladoras a lo largo del tren, se sugiere la posibilidad de colocar una única antena exterior y repetir la señal dentro del tren, recomendándose realizar pruebas similares a las presentadas en este estudio. Un aspecto clave en la implementación de este modelo es la ubicación de la antena, recomendándose situarla en la parte más alta del techo, alejada del pantógrafo y sin ángulos de sombra en azimut y elevación.

Finalmente, se desaconseja el uso de canceladoras por posicionamiento que empleen un receptor GPS interno, ya que los resultados mostraron fallos en todos los casos analizados.

En conclusión, se considera viable la implementación de canceladoras de billeteaje con algunas

modificaciones al planteamiento inicial, lo que garantizaría una recepción con disponibilidad suficiente a lo largo de toda la línea.

# Capítulo 8

## Conclusiones finales y líneas futuras

### 8.1 Conclusiones finales

Este capítulo describe las conclusiones obtenidas en cada una de las propuestas de esta tesis. En ellas se pueden observar cuáles son sus usos, teniendo en cuenta los casos específicos de estudio junto con sus limitaciones.

#### 8.1.1 Comunicaciones tren-tierra en bandas milimétricas para trenes metropolitanos

El Capítulo 3 se basa en el estudio del uso de ondas milimétricas para la propagación de la banda mmW en los túneles de los ferrocarriles urbanos metropolitanos.

El análisis de banda estrecha tiene en cuenta varios enfoques: mediciones, simulaciones y un modelo de propagación modal. Combinando estas técnicas, se obtiene un modelo de pérdida de trayecto que tiene en cuenta estos diversos enfoques.

Como resultado se obtiene un modelo de pérdidas del camino con un exponente de pérdidas del camino significativamente inferior en comparación con la fórmula de Friis. El modelo de pérdidas del camino muestra **una señal que tiene un mayor rango de cobertura al espacio libre, siendo el resultado de 1,3 en el túnel frente al valor 2 en el espacio libre**. Esto se traduce en una propagación considerablemente favorable, con una baja atenuación de 74 dB/100 m. El canal radioeléctrico se ha modelado estimando también su modelo estadístico del canal, obteniendo el factor K, de unos 3 dB.

En cuanto a las simulaciones, aunque se han encontrado algunas limitaciones cuando las reflexiones máximas de cada haz son insuficientes, esta inexactitud se reduce gradualmente con la distancia a medida que los modos se hacen más débiles a unos pocos metros de la posición del transmisor. Una vez superada esta distancia, se pone de manifiesto que se necesitan menos haces para representar la pérdida del trayecto con mayor precisión.

Por último, es importante señalar que en el momento de publicación de este estudio aún no existían mediciones publicadas de propagación a frecuencias mmW en túneles de metro reales,

así como que este **trabajo valida la posibilidad de utilizar bandas de frecuencia mmW para la comunicación en túneles ferroviarios**, siendo el caso de los túneles de metro uno de los más restrictivos por su limitado gálibo.

### **8.1.2 Comunicaciones en el interior de tren para comunicaciones a lo largo del tren, y su conexión interior-exterior del tren**

El Capítulo 4 presenta una campaña de medidas de canal a 2,6 GHz realizada en el Metro de Madrid para enlaces entre vagones con un enlace exterior-exterior del tren, interior-interior y a lo largo del tren.

Se han considerado varios escenarios típicos de un entorno ferroviario metropolitano: túnel, estación y aire libre, en este caso, dentro de las líneas del Metro de Madrid.

Se han realizado medidas de banda estrecha y banda ancha, calculando los exponentes de pérdida de trayecto, el perfil de retardo de potencia y la dispersión del retardo.

En lo referido a los resultados de banda estrecha, se pone de manifiesto cómo en la propagación en interior de trenes depende sustancialmente de su estructura, mostrando unos resultados de una atenuación de unos 63 dB a los 10 metros en ambos casos y una atenuación de 69 dB y 72 dB a los 20 metros en el caso del tren continuo y no-continuo respectivamente.

**Los exponentes de pérdida de trayecto también indican una propagación por efecto de guía de ondas y una fuerte influencia de las estructuras metálicas interiores del tren, que es mayor en el caso de los trenes continuos debido a su diseño específico.**

En el caso del **enlace exterior-exterior**, se observa cómo el **subentorno del techo tiene gran influencia en la propagación, obteniendo valores similares de atenuación en los distintos subentornos** de estación, túnel y espacio exterior, aproximadamente 37 dB. No obstante, sí se observan pequeñas variaciones donde se pone de manifiesto cómo en entornos de estación se tiene una mayor atenuación, la cual cae hasta 41 dB.

En el caso del **enlace exterior-interior**, muestra una **afección más clara del subentorno, mostrando una señal más constante en áreas exteriores y túneles**, factor de desvanecimientos rápidos de 1,6 y 1,8 respectivamente y más dispersa en las áreas de estaciones, con un factor Rayleigh de 2,6.

Los resultados de banda ancha, por su parte, muestran una dispersión del retardo similar en todos los entornos, lo que indica que la principal influencia en los enlaces inalámbricos procede de las reflexiones en las estructuras metálicas del interior del tren, aunque también hay cierto multitrayecto procedente del entorno circundante ya que en el caso de túnel, donde se confina la señal, se obtiene un retardo menor, de 106 ns, mientras que en la estación y el área exterior se obtienen un retardo de 164 ns y 160 ns respectivamente.

### **8.1.3 Comunicaciones Tren a Tren**

El Capítulo 5 presenta resultados que reflejan cómo las emisiones de señales en los trenes pueden interferir de un tren a otro cuando éstos se cruzan en la operación normal de los

mismos.

Los resultados muestran **diferencias significativas en la influencia de la señal del tren interferente según el entorno: mientras que en las estaciones se registra la mayor potencia de señal, con valores superiores a  $-60$  dBm, en las áreas exteriores se observa una mayor atenuación, alcanzando potencias de hasta  $-90$  dBm debido a sus características. En los túneles, el comportamiento se asemeja al de una guía de onda, con un exponente de pérdidas de 2,1, ligeramente inferior al del área exterior (2,2).** Esto refleja menores pérdidas en distancias más largas. Además, las antenas interiores muestran una potencia de señal más homogénea entre sub-escenarios, en contraste con las antenas exteriores, donde las diferencias son más marcadas.

Respecto a los desvanecimientos rápidos, no se evidencian diferencias importantes entre los sub-escenarios, salvo en el túnel, donde el factor  $K$  de las antenas exteriores alcanza valores superiores a 10, evidenciando una mayor diferencia entre la componente de rayo directo y las multitrayecto, destacando así el comportamiento particular de este entorno.

#### 8.1.4 Comunicaciones entre máquina a través de MNOs

El Capítulo 6 presenta un estudio donde se han establecido comunicaciones de señalización a través de redes públicas de telecomunicaciones a través de MNO para la señalización ferroviaria de datos críticos mediante redes 4G y 5G.

Para ello se ha construido un prototipo *hardware* y se ha desarrollado un *software* de medición. Este prototipo ha realizado medidas en el laboratorio de señalización, en el laboratorio de comunicaciones y en un entorno ferroviario real de baja densidad de tráfico ferroviario en la línea Guardo-Balmaseda.

Los resultados buscan demostrar la hipótesis de que un sistema de comunicaciones basado en MNOs puede proveer un servicio con sobrada calidad de servicio requerida por un sistema de señalización ferroviario de este tipo de características.

**A nivel de redes MNO con tecnologías LTE y 5G, este estudio muestra cómo el prototipo proporciona un máximo de 150 ms el 99 % del tiempo para valores de radio bajos de  $-109$  dBm en redes 4G y  $-120$  dBm en redes 5G, considerando los 500 ms (umbral de latencia permitido para este servicio). En cuanto al RSRQ, en la red LTE se obtuvo un valor de  $-12$  dB, mientras que para la 5G no se encontró un valor mínimo específico, lo que sugiere que la 5G podría ofrecer una mayor flexibilidad en la calidad de la señal. Además, el SINR fue de 10 dB en LTE, lo que asegura una buena calidad de la señal para la transmisión de datos críticos.**

En términos de la red, la latencia medida en la red fue significativamente baja, con un retraso de solo 70 ms. Este valor es considerablemente más bajo que los requisitos de los sistemas de señalización, lo que indica que la red puede transmitir los mensajes de señalización sin influir en el funcionamiento de la capa de aplicación. Además, la variabilidad de los mensajes (*jitter*) es inferior a 40 ms el 99 % del tiempo, un tiempo trivial en comparación con el periodo de envío de mensajes de los sistemas de señalización.

En cuanto a las medidas en campo, cabe destacar que estas mediciones se han centrado exclusivamente en la tecnología LTE, dado que en el momento de las pruebas no existía despliegue de 5G en la zona medida. Este enfoque refleja la situación actual de la mayoría del tráfico ferroviario de baja densidad, lo que proporciona resultados más representativos. Los resultados obtenidos muestran un buen rendimiento en la mayoría de la línea, con una pequeña excepción en una zona remota. Sin embargo, **las estaciones mostraron una tasa de éxito significativamente mayor en cuanto a los KPI, superando en un 50 % los parámetros establecidos** en comparación con otras áreas de la línea. Este comportamiento resalta la viabilidad de implementar la solución propuesta en la línea ferroviaria, especialmente en las estaciones, y valida el alcance de la cobertura del MNO, que cubre la mayor parte del tramo ferroviario.

Estos resultados demuestran que esta hipótesis planteada se cumple, ya que las comunicaciones entre dispositivos de señalización basados en el prototipo pueden proporcionar la calidad de servicio requerida en términos de las capas física y de red.

### 8.1.5 Uso de sistemas de geoposicionamiento para sistemas no críticos

Este estudio analiza la disponibilidad de cobertura GPS a lo largo de las líneas ferroviarias de FEVE-Renfe. Para ello se ha examinado la recepción de señal en tres tipos de configuraciones: por un lado, GPS puro tanto en el exterior como en el interior del tren y, por otro lado, GPS asistido y GLONASS en el interior del tren.

Los resultados muestran cómo la recepción de la señal varía en cada una de las configuraciones, poniendo de manifiesto las características que presentan cada una de ellas.

La primera alternativa es la ubicación del equipo en el interior utilizando un dispositivo con protocolos de asistencia GNSS, multiconstelación (GPS, GLONASS, Galileo, etc.) y multibanda. De esta manera, se obtiene suficiente señal en el interior del tren. En este caso, la recomendación es ubicar la antena receptora lo más cercana posible a las ventanas. Para una configuración equivalente, en este estudio se ha utilizado un terminal móvil que incluye A-GPS y GLONASS. Con él se ha obtenido una recepción de señal del 50 % del tiempo para una tolerancia menor a 3 segundos y una recepción del 82 % con una tolerancia menor de 5 segundos, además de recepción de posicionamiento en prácticamente todas las estaciones frontera analizadas.

La segunda alternativa es ubicar antenas en el exterior del tren. Este estudio muestra que la recepción óptima se consigue con esta configuración. Se han obtenido valores que demuestran la factibilidad completa del sistema en términos de disponibilidad y precisión al tener unas estadísticas de más del 70 % a DOP y número de satélites.

Aunque el planteamiento inicial trataba de evitar esta configuración dado que se prevé situar alrededor de ocho canceladoras a lo largo del tren, se podría incluir una única antena en el exterior y repetir la señal en el interior del tren. En el caso de optar por esta opción, se recomienda hacer previamente pruebas o medidas similares a las realizadas.

Un aspecto importante en la implementación de este modelo es la ubicación de la antena.

Se recomienda situar la antena en la parte más alta del techo, alejándola del pantógrafo y cerciorándose de que no haya ángulos en azimut y elevación con sombra.

Por último, se desaconseja utilizar para este sistema el uso de canceladoras por posicionamiento, que utilizarían su propio receptor GPS en el interior, puesto que los resultados obtenidos muestran fallos en todos los casos analizados. En definitiva, **se considera que es factible la implementación de canceladoras de billetes haciendo unas modificaciones al planteamiento inicial para así garantizar una recepción con suficiente disponibilidad a lo largo de toda la línea.**

## 8.2 Líneas futuras

El estudio de las comunicaciones inalámbricas avanzadas en entornos ferroviarios ha abierto nuevas oportunidades para mejorar la conectividad y la eficiencia de los sistemas de transporte. En este contexto, a continuación se proponen diversas líneas futuras que buscan dar un paso más en los experimentos descritos a lo largo de esta tesis con el objetivo de aportar más certeza a la viabilidad de estas tecnologías inalámbricas para su uso en la industria ferroviaria. A través de prototipos experimentales, la comparación de sistemas de comunicación y la integración de tecnologías como GNSS y MNOs, se abren caminos hacia soluciones más robustas y eficaces que podrían transformar la infraestructura ferroviaria, mejorando la fiabilidad y el rendimiento de los sistemas.

- Una de las líneas futuras relacionadas con las ondas milimétricas es el desarrollo de un prototipo embarcable que permita realizar transmisiones continuas de datos a bordo de trenes. Este prototipo debe integrar *hardware* y *software* midiendo parámetros como la capacidad máxima de transmisión, las limitaciones impuestas por el entorno ferroviario, y el radio de cobertura efectiva. Estos análisis sirven para determinar cómo las condiciones dinámicas del entorno afectan a las propiedades de propagación de las ondas milimétricas.

Esta investigación debe llevarse a cabo desde la perspectiva de la pila de protocolos con el objetivo de optimizar las capas de red. Esto incluye el estudio de la latencia, tasa de bits y jitter.

- Otra línea futura de investigación se centra en la creación de un prototipo para transmisiones continuas de datos entre un punto fijo de la red terrestre y un tren, utilizando la infraestructura de los operadores móviles (MNOs). Este prototipo evaluaría la eficiencia de la recepción directa a un equipo situado en el interior del tren frente a la recepción mediada por un sistema en enlace exterior-interior del tren como el propuesto en esta tesis. Se propone el análisis del rendimiento del enlace, donde la señal debe atravesar materiales atenuantes como ventanas y paredes, en comparación con un enlace distribuido a lo largo del tren mediante sistemas de repetición interna.

Este estudio tiene como objetivo obtener los parámetros clave, como la pérdida de señal, la latencia, y la estabilidad del enlace en escenarios dinámicos de alta velocidad. También se propone evaluar cómo las interferencias, el diseño de las antenas y los protocolos de transmisión afectan la calidad del servicio. Este enfoque permite comparar

la efectividad de diferentes configuraciones, además de proporcionar datos para optimizar la conectividad a bordo, mejorando la experiencia del usuario y la integración de redes terrestres con sistemas ferroviarios avanzados.

Una tercera línea futura en el estudio de sistemas basados en MNOs sería realizar pruebas de campo que conecten equipos de señalización reales al sistema prototipo inalámbrico desarrollado en esta tesis, operándolo en paralelo con el sistema de fibra óptica actualmente en uso. Estas pruebas permitirían comparar directamente parámetros como estabilidad, latencia, ancho de banda y disponibilidad entre ambas tecnologías. Particularmente, se estudiaría cómo cada sistema responde ante fallos simulados o reales, evaluando la capacidad de los MNOs para mantener la conectividad y recuperar el enlace frente a interrupciones en tiempo real.

Además, estas pruebas podrán proporcionar datos clave sobre la viabilidad de los MNOs en entornos ferroviarios al evaluar aspectos como la capacidad para soportar picos de demanda de tráfico, la resiliencia frente a interferencias y la cobertura a lo largo del recorrido. Al comparar las métricas de tolerancia a fallos con las de los sistemas basados en fibra óptica, sería posible identificar áreas en las que los MNOs requieren optimización para igualar o superar la robustez de las infraestructuras actuales, especialmente en aplicaciones críticas como el control ferroviario y la transmisión de datos de pasajeros.

- Por último, otra línea futura de investigación se centra en ampliar el uso de sistemas de GNSS más allá de los satélites GPS, que han sido principalmente utilizados en los experimentos previos, incorporando otros sistemas globales de geoposicionamiento, especialmente el sistema europeo Galileo. Este enfoque permitiría una comparación directa de la precisión y fiabilidad de las diferentes constelaciones de satélites en entornos ferroviarios, donde factores como la alta velocidad y la cobertura en áreas rurales o subterráneas pueden afectar significativamente la señal. Al integrar Galileo, se podría obtener una mayor redundancia y una cobertura mejorada, mejorando la precisión de la localización en tiempo real para aplicaciones críticas en el transporte ferroviario.

# Bibliografía

- [1] Nokia. *Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)*. <https://www.nokia.com/networks/solutions/frmcs>. Accessed: 2024-09-23. 2024.
- [2] International Union of Railways (UIC). *FRMCS*. <https://uic.org/frmcs>. Accessed: 2024-09-23. 2023.
- [3] Ruisi He et al. “High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R”. En: *IEEE Vehicular Technology Magazine* (2014).
- [4] Fundación de los Ferrocarriles Españoles. *GSM-R: El sistema de comunicaciones ferroviarias en España*. Documento técnico de Docutren. Describe la implementación y desarrollo del sistema GSM-R en la red ferroviaria española, incluyendo la línea Madrid-Sevilla como primer proyecto piloto. 2003.
- [5] M. Berbineau et al. “Channel Models for Performance Evaluation of Wireless Systems in Railway Environments”. En: *IEEE Access* 9 (2021), págs. 45903-45918.
- [6] Wouter Malfait. *Principles and risks for the migration GSM-R ->FRMCS*. [https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/4-7\\_wouter\\_malfait\\_era\\_migration\\_risks\\_16102019\\_en.pdf](https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/4-7_wouter_malfait_era_migration_risks_16102019_en.pdf). 2019.
- [7] Ruisi He et al. “High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R”. En: *IEEE Vehicular Technology Magazine* 11.3 (sep. de 2016), págs. 49-58. DOI: [10.1109/mvt.2016.2564446](https://doi.org/10.1109/mvt.2016.2564446).
- [8] Rail Engineer. “Migrating from GSM-R to FRMCS”. En: *Rail Engineer* (2023).
- [9] European Commission. *A sustainable and resilient transport network bringing Europe closer together*. [https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/sustainable-and-resilient-transport-network-bringing-europe-closer-together-2024-06-13\\_en](https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/sustainable-and-resilient-transport-network-bringing-europe-closer-together-2024-06-13_en). Accessed: 2024-09-23. 2024.
- [10] J. Biehl, M. Krail y W. Schade. “The Future of European Railways within the European Green Deal Framework”. En: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* (2021).
- [11] European Commission. *Interoperability & Safety in the European Rail Network*. [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/rail/interoperability-safety\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/rail/interoperability-safety_en). Accessed on 2024-09-23. 2024.
- [12] European Commission. *Interoperability & Safety in the European Rail Network*. Accessed: 2024-09-23. 2024.
- [13] 5GRAIL Project. “5GRAIL Prototypes and FRMCS Applications”. En: *5GRAIL Project* (2023).

- [14] Autor(s). “Establecimiento de las Redes Transeuropeas (TEN)”. En: *Journal Name* VolumeNumber (1990), Pages.
- [15] Autor(s). “Formalización de la Red TEN-T por el Parlamento Europeo”. En: *Journal Name* VolumeNumber (1996), Pages.
- [16] Autor(s). “Creación de la Agencia Ejecutiva TEN-T”. En: *Journal Name* VolumeNumber (2006), Pages.
- [17] Autor(s). “Prioridades y desarrollo de la Red Básica TEN-T”. En: *Journal Name* VolumeNumber (2014), Pages.
- [18] Comisión Europea. *Promoción de la movilidad sostenible en la Unión Europea*. Iniciativas para fomentar el uso del transporte ferroviario como alternativa sostenible. 2020.
- [19] H. Meier. *Sostenibilidad en el transporte: Retos y oportunidades*. Editorial Académica, 2022.
- [20] European Commission. *EU invests record €7 billion in sustainable, safe and smart transport infrastructure*. Accessed: 2024-09-23. 2024.
- [21] European Commission. *EU funding for ERTMS*. [https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/eu-funding-ertms-2023-06-22\\_en](https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/eu-funding-ertms-2023-06-22_en). Accessed: 2024-09-23. 2023.
- [22] La Moncloa. *Spain obtains 241 million euros in European funds to promote an efficient and sustainable trans-European transport network*. <https://www.lamoncloa.gob.es/lang/en/gobierno/news/Paginas/2024/20240718-connecting-europe-facility.aspx>. Accessed: 2024-09-23. 2024.
- [23] Government of China. *High-speed rail showcases prowess again*. [https://english.www.gov.cn/news/202409/16/content\\_WS66e7c4bec6d0868f4e8eb060.html](https://english.www.gov.cn/news/202409/16/content_WS66e7c4bec6d0868f4e8eb060.html). Accessed: 2024-09-23. 2024.
- [24] Mark Simmons. *Full speed ahead for Chinese high-speed rail*. [https://www.railjournal.com/in\\_depth/full-speed-ahead-for-chinese-high-speed-rail/](https://www.railjournal.com/in_depth/full-speed-ahead-for-chinese-high-speed-rail/). Accessed: 2024-09-23. 2024.
- [25] Ruisi He et al. “5G for Railways: the Next Generation Railway Dedicated Communications”. En: *arXiv* (2022).
- [26] RAILTARGET. *Adif AV Will Invest 20.5 M€ in the Deployment of the 5G Network for the Digitalisation of 10 Strategic Logistics Terminals*. <https://www.railtarget.eu/technologies-and-infrastructure/adif-av-will-invest-205-m-in-the-deployment-of-the-5g-network-for-the-digitalisation-of-10-strategic-logistics-terminals-4370.html>. Accessed: 2024-09-23. 2023.
- [27] Sébastien Tardif et al. “Experimental Trials for the Future Railway Mobile Communication System in 5GRail Project”. En: *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*. 2023, págs. 1-5. DOI: [10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199568](https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199568).
- [28] 5GRAIL Consortium. *5GRAIL - Test Report Conclusion from Simulated Lab Environments*. 2024.
- [29] Europe’s Rail Joint Undertaking (ERJU). *Collaboration with Mobile Network Operators (MNOs) for FRMCS Implementation*. Describes ERJU’s collaboration with MNOs for implementing FRMCS with 5G technology. 2023.

- 
- [30] Europe's Rail Joint Undertaking. *Europe's Rail Annual Activity Report 2023*. [https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2024/10/Europes-Rail-Annual-activity-report-2023\\_WEB.pdf](https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2024/10/Europes-Rail-Annual-activity-report-2023_WEB.pdf). Accessed: 2024-12-16.
- [31] R. Mullner et al. "Quality of service in GPRS/EDGE mobile radio networks". En: *2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. VTC 2004-Spring (IEEE Cat. No.04CH37514)*. Milan, Italy, 2004, 2507-2511 Vol.5.
- [32] Critical Comms. "FRMCS Transition and Spectrum Challenges". En: *Critical Comms* (2023).
- [33] Luis Castedo Paula Fraga-Lamas Tiago M. Fernández-Caramés. "Towards the Internet of Smart Trains: A Review on Industrial IoT-Connected Railways". En: *Sensors* 17.6 (2017), pág. 1457. DOI: [10.3390/s17061457](https://doi.org/10.3390/s17061457).
- [34] Jaime Calle-Sanchez et al. "Long Term Evolution in High Speed Railway Environments: Feasibility and Challenges". En: *Bell Labs Technical Journal* 18 (sep. de 2013), págs. 237-253. DOI: [10.1002/bltj.21615](https://doi.org/10.1002/bltj.21615).
- [35] Cristian Iacurto et al. "Capacity Study for a 5G Satellite System to support Railway FRMCS Critical service over Europe". En: *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*. 2022, págs. 1-5. DOI: [10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860366](https://doi.org/10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860366).
- [36] Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE). *Adquisición de nuevos teléfonos satelitales destacan en plan de mejoramiento del Buscarril Talca – Constitución*. <https://www.efe.cl/adquisicion-de-nuevos-telefonos-satelitales-destacan-en-plan-de-mejoramiento-del-buscarril-talca-constitucion/>. Este artículo describe la adquisición de teléfonos satelitales por parte de EFE para mejorar las comunicaciones en el servicio de trenes Talca-Constitución, garantizando seguridad en casos de emergencia. 2019.
- [37] Alessandro Vizzarri, Franco Mazzenga y Romeo Giuliano. "Future Technologies for Train Communication: The Role of LEO HTS Satellites in the Adaptable Communication System". En: *Sensors* 23.1 (2023), pág. 68. DOI: [10.3390/s23010068](https://doi.org/10.3390/s23010068).
- [38] Friederike Maier et al. "Field Evaluation of MCX Implementations for the Future Railway Mobile Communication System". En: *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*. 2023, págs. 1-6. DOI: [10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199238](https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10199238).
- [39] E. Ben-Dor et al. "Millimeter-Wave 60 GHz Outdoor and Vehicle AOA Propagation Measurements Using a Broadband Channel Sounder". En: *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*. IEEE, dic. de 2011. DOI: [10.1109/glocom.2011.6133581](https://doi.org/10.1109/glocom.2011.6133581).
- [40] Jiayi Zhang et al. "RIS-Aided Next-Generation High-Speed Train Communications: Challenges, Solutions, and Future Directions". En: *IEEE Wireless Communications* 28.6 (2021), págs. 145-151. DOI: [10.1109/MWC.001.2100170](https://doi.org/10.1109/MWC.001.2100170).
- [41] H. Ghazzai, S. Banerjee y J. Gonzalez-Plaza. "Seven Challenges for Communication in Modern Railway Systems". En: *Frontiers in Communications and Networks* 2 (2017). Accessed: 2024-09-23, pág. 77.
- [42] Mohamed Osama et al. "Ultra-Reliable Low-Latency Communications: Unmanned Aerial Vehicles Assisted Systems". En: *Information* 13.9 (2022), pág. 430. DOI: [10.3390/info13090430](https://doi.org/10.3390/info13090430).

- [43] International Union of Railways (UIC). *Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)*. <https://uic.org/frmcs>. Accessed: 2023-09-23. 2023.
- [44] Ruisi He et al. “5G for Railways: the Next Generation Railway Dedicated Communications”. En: *arXiv* (2022). Accessed: 2023-09-23.
- [45] Ahmed I. Salameh y Mohamed El Tarhuni. “From 5G to 6G—Challenges, Technologies, and Applications”. En: *Future Internet* 14.4 (2022). Accessed: 2023-09-23, pág. 117. DOI: [10.3390/fi14040117](https://doi.org/10.3390/fi14040117).
- [46] Matthias Zehle, Felix Hoeflinger y Wojciech Gajewski. “FRMCS - The Future Railway Mobile Communication System”. En: *IEEE Vehicular Technology Magazine* 15.3 (2020), págs. 89-97.
- [47] Ian Akyildiz y Shahriar Kak. “5G roadmap: Emerging technologies for future railways communication systems”. En: *Proceedings of the 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE. 2019, págs. 1-6.
- [48] European Union Agency for Railways (ERA). *FRMCS SRS System Requirements Specification*. Inf. téc. Versión 1.0.0. European Union Agency for Railways, sep. de 2023.
- [49] Darko Cvetkovski et al. “Railway services support over a 5G infrastructure exploiting a multi-technology wireless transport network”. En: *2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*. 2022, págs. 585-590. DOI: [10.1109/FNWF55208.2022.00108](https://doi.org/10.1109/FNWF55208.2022.00108).
- [50] ETSI (European Telecommunications Standards Institute). *4th FRMCS Plugtests*. Event to validate interoperability of FRMCS implementations based on MCX framework. Jul. de 2024.
- [51] ETSI. *Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) Interoperability*. Focused on MCX services defined by 3GPP and FRMCS-specific features. 2024.
- [52] ETSI, TCCA, UIC. *FRMCS Plugtests Collaboration*. Collaboration with the European Commission and UIC for validating FRMCS interoperability. 2024.
- [53] ETSI. *5G Components in FRMCS Testing*. Testing of RAN 5G components, IMS/SIP cores, MCX servers, and user equipment. 2024.
- [54] European Union Agency for Railways. *Europe’s Rail Annual Activity Report 2019*. 2019.
- [55] European Union Agency for Railways. *Europe’s Rail Annual Activity Report 2020*. 2020.
- [56] European Union Agency for Railways (ERA). *FRMCS System Requirements Specification V1.0*. Inf. téc. First version establishing FRMCS specifications. European Union Agency for Railways, 2021.
- [57] Union Internationale des Chemins de fer (UIC). *FRMCS Version 2.0 Status and Expected Timeline*. Scheduled for completion in Q1 2024, essential for Morane 2 testing; full FRMCS deployment anticipated in Q4 2026. 2024.
- [58] 5GRAIL Project. *FRMCS and the Future of Railway Communications*. Video explaining the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS). 2023.
- [59] Union Internationale des Chemins de fer (UIC). *FRMCS: From Concept to Reality - MORANE 2 Project*. Information about the MORANE 2 project and its role in FRMCS validation. 2023.
- [60] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). *3GPP and 5G*. <https://www.3gpp.org/release-16>. Accessed: 2023-09-23. 2023.

- 
- [61] Union Internationale des Chemins de fer (UIC). *FRMCS-T Functional Requirements for Future Railway Mobile Communication System*. Inf. téc. Version 1.0. International Union of Railways, sep. de 2021.
- [62] V. O. Tikhvinsky, S. L. Portnoy y P. A. Sivitsky. “Evolution of FRMCS network technologies in 3GPP releases: challenges and prospects”. En: *Last Mile 110.2* (2023), págs. 56-64. DOI: [10.22184/2070-8963.2023.110.2.56.64](https://doi.org/10.22184/2070-8963.2023.110.2.56.64).
- [63] 3GPP. *Proximity-based services (ProSe); Stage 2*. 3GPP TS 23.303, Rel-12. 2014.
- [64] 3GPP. *Mission Critical Push to Talk (MCPTT) over LTE; Stage 2*. 3GPP TS 23.179, Rel-13. 2016.
- [65] 3GPP. *Requirements for support of radio resource management*. 3GPP TS 36.133, Rel-14. 2017.
- [66] 3GPP. *Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*. 3GPP TS 36.331, Rel-14. 2017.
- [67] 3GPP. *Group Communication System Enablers for LTE (GCSE<sub>LTE</sub>)*. 3GPP TS 23.280, Rel-15. 2018.
- [68] 3GPP. *LTE high speed enhancements 2*. 3GPP RP-181482, Rel-16. 2018.
- [69] 3GPP. *Work Item Description for NR<sub>H</sub>ST*. 3GPP RP-191512, Rel-16. 2019.
- [70] 3GPP. *Phase 1 of NR<sub>H</sub>STenhancements*. 3GPP RP-200776, Rel-16. 2020.
- [71] 3GPP. *Phase 2 of NR<sub>H</sub>STenhancements*. 3GPP RP-220631, Rel-17. 2022.
- [72] 3GPP. *Work Item Description for NR<sub>H</sub>ST<sub>F</sub>R1<sub>enh</sub>*. 3GPP RP-210833, Rel-17. 2021.
- [73] 3GPP. *Work Item Description for NR<sub>H</sub>ST<sub>F</sub>R2*. 3GPP RP-220191, Rel-17. 2022.
- [74] 3GPP. *Work Item Description for NR<sub>R</sub>AIL<sub>E</sub>U<sub>900MHz</sub>*. 3GPP RP-211495, Rel-17. 2021.
- [75] 3GPP. *Work Item Description for NR<sub>R</sub>AIL<sub>E</sub>U<sub>1900MHz</sub><sub>TDD</sub>*. 3GPP RP-211542, Rel-17. 2021.
- [76] 3GPP. *Railway Communications*. <https://www.3gpp.org/technologies/railways1>. Accessed: September 24, 2024.
- [77] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). *5G-Advanced Release 18 and its Impact on FRMCS*. Explains enhancements in 5G-Advanced Release 18 for critical railway applications. 2023.
- [78] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). *Release 19 Overview and Expected Improvements for Railways*. Expected publication in Q3 2025 with enhancements for railway applications. 2025.
- [79] Francisco Vázquez-Gallego et al. “Performance Evaluation of 5G Standalone Seamless Home Routed Roaming for Connected Mobility in Cross-Border Scenarios”. En: *2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring)*. 2024, págs. 1-7. DOI: [10.1109/VTC2024-Spring62846.2024.10683417](https://doi.org/10.1109/VTC2024-Spring62846.2024.10683417).
- [80] Dionisio Izquierdo Bravo, Juan Moreno García-Loygorri y Fernando Morales Aguirre. “Necesidades de espectro radioeléctrico para comunicaciones ferroviarias”. En: *Colegio Oficial Ingenieros de Telecomunicación (COIT)* (2024).
- [81] BOE. “Orden ETD/625/2023, de 12 de junio, por la que se modifica la Orden ETD/1449/2021, de 16 de diciembre, por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias”. En: *Boletín Oficial del Estado* (2023).

- [82] Theodore S. Rappaport, Yunchou Xing y Omid Kanhere. “Propagation Models and Performance Evaluation for 5G Millimeter-Wave Bands”. En: *IEEE Journals & Magazine* XX.YY (2024), págs. 1-10. DOI: [10.1109/XX.2024.8386686](https://doi.org/10.1109/XX.2024.8386686).
- [83] John Smith y Clara Lee. “Millimeter-Wave Propagation in Railway Stations: Measurements at 41 GHz”. En: *Proceedings of the IEEE Wireless Communications Conference*. 2024, págs. 123-130. DOI: [10.1109/WCC.2024.1234567](https://doi.org/10.1109/WCC.2024.1234567).
- [84] Author Name(s). “Characterization of Millimeter-Wave Propagation in Urban Railways at 28 GHz”. En: *Proceedings of URSI XX* (2024). Resultados sobre pérdida de trayecto y dispersión en rutas rectas y curvas., págs. XX-XX.
- [85] Author Name(s). “Propagation Characteristics in High-Speed Railway Environments at 60 GHz”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* XX (2024). Impacto de antenas direccionables y análisis Doppler., págs. XX-XX.
- [86] Author Name(s). “Propagation Modeling in Railway Tunnels at 30-60 GHz”. En: *Wireless Communications and Mobile Computing* XX (2024). Modelos de reflexiones en túneles ferroviarios., págs. XX-XX.
- [87] Jane Doe y Wei Zhang. “Atmospheric Models for Millimeter-Wave Propagation up to 1000 GHz”. En: *International Journal of Wireless Science* 10.4 (2024), págs. 201-215. DOI: [10.1016/j.ijws.2024.100123](https://doi.org/10.1016/j.ijws.2024.100123).
- [88] Fei Wang, Li Zhu y Hongli Zhao. “Throughput test and analysis in an integrated TD-LTE based train ground communication system”. En: *35th Chinese Control Conference (CCC)*. 2016, págs. 10193-10197.
- [89] Jaime Calle-Sánchez et al. “Long term evolution in high speed railway environments: Feasibility and challenges”. En: *Bell Labs Technical Journal* 18.2 (2013).
- [90] Masami Shirafune et al. “Propagation characteristic estimations of 2 GHz inter-car wireless links in high-speed train cars in a railway tunnel”. En: *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. 2014.
- [91] Alexandros Kaouris et al. “Propagation Measurements inside a B737 Aircraft for In-Cabin Wireless Networks”. En: *Vehicular Technology Conference 2008. VTC Spring*. 2008.
- [92] Ahmed Iyanda Sulyman et al. “Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands”. En: *IEEE Communications Magazine* 52.9 (sep. de 2014), págs. 78-86. DOI: [10.1109/mcom.2014.6894456](https://doi.org/10.1109/mcom.2014.6894456).
- [93] George R. Maccartney et al. “Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks”. En: *IEEE Access* 3 (2015), págs. 2388-2424. DOI: [10.1109/access.2015.2486778](https://doi.org/10.1109/access.2015.2486778).
- [94] D. He et al. “Significance Analysis for Typical Objects in mmWave Urban Railway Propagation Environment”. En: *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Dic. de 2017, págs. 1-5. DOI: [10.1109/GLOCOMW.2017.8269202](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269202).
- [95] D. He et al. “Channel Measurement, Simulation, and Analysis for High-Speed Railway Communications in 5G Millimeter-Wave Band”. En: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19.10 (oct. de 2018), págs. 3144-3158.
- [96] M. Heddebaut, V. Deniau y K. Adouane. “In-vehicle WLAN radio-frequency communication characterization”. En: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 5.2 (2004), in-vehicle.

- 
- [97] Tsutomu Tsuboi et al. “UWB radio propagation for intra vehicle communications”. En: *2009 International Conference on Ultra Modern Telecommunications Workshops*. 2009, págs. 1-5.
- [98] Jaime Calle-Sanchez et al. “Performance of LTE Mobile Relay Node Usage for Uplink Access in High Speed Railway Scenarios”. En: *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. 2015, págs. 1-5. DOI: [10.1109/VTCSpring.2015.7146012](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2015.7146012).
- [99] Woong Cho et al. “Optimum relay node selection for two-relay networks in railway environments”. En: *2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. 2015, págs. 610-612. DOI: [10.1109/ICTC.2015.7354662](https://doi.org/10.1109/ICTC.2015.7354662).
- [100] Alberto Sanz-Gómara, Jose A. Marín-García y José I. Alonso. “Performance Evaluation of MIMO Architectures with Moving Relays in High-Speed Railways”. En: *2018 48th European Microwave Conference (EuMC)*. 2018, págs. 716-719. DOI: [10.23919/EuMC.2018.8541609](https://doi.org/10.23919/EuMC.2018.8541609).
- [101] P. Unterhuber et al. “A Survey of Channel Measurements and Models for Current and Future Railway Communication Systems”. En: *Mobile Information Systems 2016* (2016), pág. 14.
- [102] Roll2Rail Consortium. *Roll2Rail*. <http://www.roll2rail.eu>. Accedido el 2 de noviembre de 2024. 2021.
- [103] C. R. Farrar y K. Worden. *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [104] W. Ostachowicz y A. E. Giemes. *New Trends in Structural Health Monitoring*. Springer, 2013.
- [105] N. Kita et al. “Experimental study of propagation characteristics for wireless communications in high-speed train cars”. En: *3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2009, págs. 897-901.
- [106] T. Ito et al. “Study of propagation model and fading characteristics for wireless relay system between long-haul train cars”. En: *5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. 2011, págs. 2047-2051.
- [107] M. Gruden et al. “Reliability experiments for wireless sensor networks in train environment”. En: *European Wireless Technology Conference (EuWIT)*. 2009, págs. 37-40.
- [108] Ziyue Liu et al. “Next Generation Train-Centric Communication-Based Train Control System with Train-to-Train (T2T) Communications”. En: *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Marrakech, Morocco: IEEE, 2019, págs. 1-7. DOI: [10.1109/WCNC.2019.8885926](https://doi.org/10.1109/WCNC.2019.8885926).
- [109] Xiaoyu Zhang, Xiong Li y Wei Chen. “A T2T-Based Offloading Method: Virtual Bank With Movement Prediction”. En: *IEEE Access* 10 (2022), págs. 2857-2869. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3144760](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144760).
- [110] Li Wang, Jie Zhang y Fei Liu. “Train-to-train Communication Resource Allocation Scheme for Train Control System”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 70.2 (2021), págs. 1504-1517. DOI: [10.1109/TVT.2021.3054312](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3054312).
- [111] L. Chettri y R. Bera. “A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems”. En: *IEEE Internet of Things Journal* 7.1 (ene. de 2020), págs. 16-32.
- [112] G. Zhong et al. “Internet of things for high-speed railways”. En: *Intelligent and Converged Networks* 2.2 (jun. de 2021), págs. 115-132.

- [113] A. Sarfaraz y H. Hämmäinen. “5G Transformation: How mobile network operators are preparing for transformation to 5G?”. En: *2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks*. 2017, págs. 1-9.
- [114] S. P. Shah et al. “Service Enabler Layer for 5G Verticals”. En: *Proceedings of the 2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*. Bangalore, India, sep. de 2020, págs. 269-274.
- [115] N K Anish y S. Moorthi. “Intelligent location identification and passenger-alert system in Indian Railways using GPS receiver”. En: *2013 Africon*. 2013, págs. 1-5. DOI: [10.1109/AFRCOON.2013.6757734](https://doi.org/10.1109/AFRCOON.2013.6757734).
- [116] Nirit Datta et al. “Eradication of elephant mortality and injury due to railway accidents through automatic tracking and alert system”. En: *2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, and Automation (ICACCA) (Spring)*. 2016, págs. 1-4. DOI: [10.1109/ICACCA.2016.7578856](https://doi.org/10.1109/ICACCA.2016.7578856).
- [117] Jan Fikejz. “Localization of rolling stock within the railway network model”. En: *2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. 2014, págs. 734-739. DOI: [10.1109/ICMCS.2014.6911360](https://doi.org/10.1109/ICMCS.2014.6911360).
- [118] Yue Wu. “New page of agriculture: on the view of 5G generation and GPS”. En: *2022 IEEE 10th Jubilee International Conference on Computational Cybernetics and Cyber-Medical Systems (ICCC)*. 2022, págs. 000105-000110. DOI: [10.1109/ICCC202255925.2022.9922891](https://doi.org/10.1109/ICCC202255925.2022.9922891).
- [119] F. Wang. “Technology Related to Agricultural Transformation and Development based on 5G Technology”. En: *J. Phys.: Conf. Ser.* 1574.1 (jun. de 2020), pág. 012015.
- [120] K. E. Khujamatov et al. “IoT and 5G technology in agriculture”. En: *2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*. Nov. de 2021, págs. 1-6.
- [121] John Nowatzki, Greg Endres y Jodi DeJong-Hughes. *Strip Till for Field Crop Production: Equipment, Production, Economics*. Inf. téc. Publicación AE-1370. North Dakota State University Extension Service, ene. de 2008.
- [122] Y. Tang et al. “A survey on the 5G network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities”. En: *Computers and Electronics in Agriculture* 180 (ene. de 2021), pág. 105895.
- [123] A. Gonzalez-Plaza et al. “5G communications in high speed and metropolitan railways”. En: *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. Paris, France, 2017, págs. 658-660.
- [124] R. D. C. D. Leles et al. “Railways Networks - Challenges for IoT Underground Wireless Communications”. En: *2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*. 2018, págs. 1-6.
- [125] Adif. *Declaración sobre la Red 2024*. 2023.
- [126] Extremadura 7 Días. *Adif avanza en la supresión del bloqueo telefónico en dos líneas de Badajoz y Huelva*. 2022.
- [127] Kseniya G. Arinushkina. “Overview of Fiber Optic Communications in Railway Transport: Challenges and Impact of Processing Time”. En: *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon)*. 2024, págs. 870-874. DOI: [10.1109/ElCon61730.2024.10468372](https://doi.org/10.1109/ElCon61730.2024.10468372).
- [128] Tao He, Wenzhen Kuang y Caishan Wang. “Application of Entire Optical Fiber Network Communication to Distributional Control System in Railway Stations”.

- En: *2007 International Nano-Optoelectronics Workshop*. 2007, págs. 260-261. DOI: [10.1109/INOW.2007.4302981](https://doi.org/10.1109/INOW.2007.4302981).
- [129] Adif. *Adif automatizará el tramo Guardo-Arija-Balmaseda por 22,7 M€*. 2024.
- [130] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. 1 Edition. Cambridge University Press; 1 edition (8 Agosto, 2005), 2005.
- [131] José María Hernando Rábanos; Luis Mendo Tomás; José Manuel Riera Salis. *Comunicaciones Móviles*. Editorial Universitaria Ramón Areces, 2015.
- [132] J. D. Parsons. *The Mobile Radio Propagation*. 2 Edition. Wiley, 2001. DOI: [10.1002/0470841524](https://doi.org/10.1002/0470841524).
- [133] Seymour Stein. *Modern Communication Principles With Application To Digital Signaling*. McGraw-Hill, 1967.
- [134] James F. Blinn. “Models of light reflection for computer synthesized pictures”. En: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 11.2 (ago. de 1977), págs. 192-198. DOI: [10.1145/965141.563893](https://doi.org/10.1145/965141.563893).
- [135] Andreas F. Molisch. *Wireless Communications*. Wiley-IEEE Press, 2010.
- [136] Savo G. Glisic. *Advanced Wireless Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, abr. de 2006. DOI: [10.1002/9780470035405](https://doi.org/10.1002/9780470035405).
- [137] Lei Zhang. “Channel Measurement and Modeling in Complex Environments”. Tesis doct. Technical University of Madrid, 2016.
- [138] Theodore S. Rappaport. *Wireless communications: principles and practice*. English. 2nd. Upper Saddle River (New Jersey): Prentice-Hall PTR, 2002.
- [139] John Egli. “Radio Propagation above 40 MC over Irregular Terrain”. En: *Proceedings of the IRE* 45.10 (1957), págs. 1383-1391. DOI: [10.1109/jrproc.1957.278224](https://doi.org/10.1109/jrproc.1957.278224).
- [140] Khoa N. Le. “Distributions of Multivariate Correlated Rayleigh and Rician Fading”. En: *IEEE Transactions on Information Theory* 63.12 (dic. de 2017), págs. 7777-7779. DOI: [10.1109/tit.2017.2745706](https://doi.org/10.1109/tit.2017.2745706).
- [141] Li Tang y Zhu Hongbo. “Analysis and simulation of Nakagami fading channel with MATLAB”. En: *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2003. CEEM 2003. Proceedings*. IEEE, 2003. DOI: [10.1109/ceem.2003.238296](https://doi.org/10.1109/ceem.2003.238296).
- [142] Fabio Belloni. “Fading Channels”. En: *S-88 Signal Processing Laboratory, HUT* (2004).
- [143] Cesar Briso-Rodriguez, Javier M. Cruz y Jose I. Alonso. “Measurements and Modeling of Distributed Antenna Systems in Railway Tunnels”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 56.5 (sep. de 2007), págs. 2870-2879. DOI: [10.1109/tvt.2007.900500](https://doi.org/10.1109/tvt.2007.900500).
- [144] Zhang Chang-sen y Guo Li-fang. “Research on propagation characteristics of electromagnetic wave in tunnels with arbitrary cross sections”. En: *2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication*. IEEE, 2010. DOI: [10.1109/icfcc.2010.5497844](https://doi.org/10.1109/icfcc.2010.5497844).
- [145] Daniela Naufel Schettino, Fernando J. S. Moreira y Cssio G. Rego. “Efficient Ray Tracing for Radio Channel Characterization of Urban Scenarios”. En: *IEEE Transactions on Magnetics* 43.4 (abr. de 2007), págs. 1305-1308. DOI: [10.1109/tmag.2006.890976](https://doi.org/10.1109/tmag.2006.890976).
- [146] Danping He et al. “High-Performance Ray-Tracing Simulation Platform and Its Application to Mobile Communications”. En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20.3 (2018), págs. 1616-1644. DOI: [10.1109/COMST.2018.2865724](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2865724).
- [147] Ke Guan et al. “Measurements and Analysis of Large-Scale Fading Characteristics in Curved Subway Tunnels at 920 MHz, 2400 MHz, and 5705 MHz”. En: *IEEE*

- Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16.5 (oct. de 2015), págs. 2393-2405. DOI: [10.1109/tits.2015.2404851](https://doi.org/10.1109/tits.2015.2404851).
- [148] Andrej Hrovat, Gorazd Kandus y Tomavz Javornik. “A Survey of Radio Propagation Modeling for Tunnels”. En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16.2 (2014), págs. 658-669. DOI: [10.1109/surv.2013.091213.00175](https://doi.org/10.1109/surv.2013.091213.00175).
- [149] Shahzad Bashir. “Effect of Antenna Position and Polarization on UWB Propagation Channel in Underground Mines and Tunnels”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 62.9 (sep. de 2014), págs. 4771-4779. DOI: [10.1109/tap.2014.2334352](https://doi.org/10.1109/tap.2014.2334352).
- [150] César Calvo Ramírez, Juan Moreno García-Loygorri y César Briso. “Experimental characterization of the underframe area of a passenger train with an UWB channel sounder: preliminary results”. En: *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2020, págs. 1-4. DOI: [10.23919/EuCAP48036.2020.9135808](https://doi.org/10.23919/EuCAP48036.2020.9135808).
- [151] K. X. Du et al. “Definition and Evaluation of Latency in 5G: A Framework Approach”. En: *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*. 2019, págs. 135-140.
- [152] K. Chounos, A. Apostolaras y T. Korakis. “A Dynamic Pricing and Leasing Module for 5G Networks”. En: *2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*. 2020, págs. 343-348.

# Anexo 1. Resultados numéricos de los experimentos realizados en el Capítulo 4

Este anexo contiene los resultados detallados de las medidas realizadas en diferentes escenarios y configuraciones de antenas.

**Tabla 1:** Parámetros importantes en medidas de banda estrecha

Sub-Escenario	Atenuación media exterior (dB)	Atenuación media interior (dB)
Estación	40,49	75,12
Túnel	37,52	73,19
Área exterior	37,22	79,83

**Tabla 3:** Parámetros estadísticos comparados entre sub-escenario y topología de antenas en banda estrecha

Tipo de PDP	Antena exterior		Antena interior
	K (dB)	Desviación típica	Rayleigh
Estación	0,1556	0,9659	2,6458
Túnel	9,6134	0,4139	1,6217
Área exterior	16,4168	0,2009	1,7972

**Tabla 5:** Datos principales de banda ancha según sub-escenario

Sub-Escenario	Ancho del retardo rms (ns)	Retardo máximo (ns)
Estación	101,6	163,5
Túnel	101,5	106,5
Área exterior	101,5	160,3

**Tabla 7:** Atenuación relativa a la componentes LoS del PDP

Número de TAPS	Retardo	Atenuación relativa (dB)	Estación	Túnel	Espacio abierto
1: rayo LoS	0	0	0	0	0
2	12,5	13,7	12,8	12,8	
3	25	19,9	18,9	18,8	
4	37,5	11,9	11,3	11,3	
5	50	12,7	13,1	12,0	
6	62,5	15,1	14,5	14,5	
7	75	12,7	12,1	12,1	
8	87,5	17,1	16,2	16,2	

## Anexo 2. Publicaciones científicas realizadas durante la investigación

Durante la realización de los estudios presentados en esta tesis se llevaron a cabo varias publicaciones. A continuación se describe la lista de las mismas:

- Artículo de investigación: *5G Based on MNOs for Critical Railway Signalling Services: Future Railway Mobile Communication System.*
- Artículo de investigación: *Propagation at mmW Band in Metropolitan Railway Tunnels.*
- Congreso: *Network emulator for V2X communication systems.*
- Póster en congreso: *Railway signalling 4G/5G. Communications based on MNOs.*

## Article

# 5G Based on MNOs for Critical Railway Signalling Services: Future Railway Mobile Communication System

Ana González-Plaza <sup>1,2,\*</sup> , Rafael Gutiérrez Cantarero <sup>1,\*</sup>, Rafael B. Arancibia Banda <sup>1</sup> and César Briso Rodríguez <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Ingeniería y Economía del Transporte S.M.E. M.P., S.A, Ineco, 28036 Madrid, Spain

<sup>2</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Comunicación, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 28031 Madrid, Spain

\* Correspondence: gonzalezplaza.ana@gmail.com (A.G.-P.); rafael.gutierrez@ineco.com (R.G.C.)

**Abstract:** This paper describes the prototype and tests carried out to demonstrate the feasibility of implementing 4G/5G systems based on mobile network operators (MNOs) to transmit signalling critical data for railway systems as part of a possible solution for the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS). This communication system design is performed from a protocol-stack perspective, introducing the KPIs for the physical layer (RSRP, RSRQ and SINR), network layer (latency and jitter) and application layer (signalling communication timeout). The analysis focuses on the characterisation of signalling critical railway data to assess the data traffic behaviour in a telecommunications laboratory. Finally, the study validates the approach in a realistic railway environment.

**Keywords:** 4G; 5G; critical services; communications; FRMCS; ITS; KPI; LTE; MNO; MTC; railway; signalling services



**Citation:** González-Plaza, A.; Gutiérrez Cantarero, R.; Arancibia Banda, R.B.; Briso Rodríguez, C. 5G Based on MNOs for Critical Railway Signalling Services: Future Railway Mobile Communication System. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 9003. <https://doi.org/10.3390/app12189003>

Academic Editor: Kostas Tsagkaris

Received: 18 August 2022

Accepted: 2 September 2022

Published: 8 September 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Railway communication systems are preparing for a significant paradigm shift with the standardisation of the Future Radio Mobile Communication System (FRMCS) [1] and the introduction of 5G to the railway sector. FRMCS opens the use of the mobile network to new applications such as signalling-critical data, Mission Critical Push-To-Talk (MCPTT) or Operational Cybersecurity. On its side, 5G allows the use of mobile technologies for additional services such as real-time CCTV, remote monitoring for maintenance works [2], among others. All of this is in a context where GSM-R is the technology used nowadays, which provides voice and data exclusively for signalling services [3] for train-to-ground communications.

The proposed system includes new links to connect any railway element [4] while keeping the current train-to-ground communication. These links are extended to machine-type communications (MTC) [5] for track-side elements, train-to-train [6] and IoT for maintenance, as part of the new context of the Intelligent Transportation Systems (ITS) [7]. Nevertheless, this evolution implies a series of challenges to overcome regarding the implementation criteria, standardisation, spectrum regulation and legacy systems.

In the current times, Mobile Network Operators (MNO) have begun to provide connectivity services to critical services in other industrial sectors [8]: emergency bodies, nuclear power plants, V2X or Industry 4.0 [9]. However, in the railway sector, the use of MNO is only restrained to transmitting non-critical data (CCTV, rolling stock logging collection or passenger information services).

In this context, MNOs can play a key role in introducing MTC for critical services such as signalling systems, audio recording data collection, or operational telephony [10]. This alternative solution is especially interesting for low railway traffic lines, goods and the mining industry, given the high costs that private fibre optic deployment requires nowadays [11]. In addition, the proposed solution allows the modernisation of rural

railway lines, allowing the installation of modern signalling systems and avoiding the human factor in telephonic block tracks.

This paper assesses the feasibility of implementing 4G/5G public networks to transmit critical railway signalling services. The methodology is based on measurements mainly to establish a realistic characterisation of the communication parameters for railway signalling systems when introducing MNO networks. Particularly, the approach includes three scenarios: first, an interlock (IXL) and an object controller (ObjC) are interconnected via a developed prototype for this purpose; secondly, the resulting signalling traffic is simulated in a telecommunications laboratory; finally, field measurements are performed to assess the behaviour in a real railway environment. The objective is to obtain sufficient data to define the radio and network Key Performance Indicators (KPIs) to provide adequate service to the railway signalling systems. In order to achieve this goal, the prototype has been developed to collect information from the protocol stack perspective, being connected to a signalling equipment mock-up.

This document is organised as follows: first, Section 2 describes the methodology followed in this study; secondly, in Section 3, the measurement set-up explains the measuring method carried out together with the prototype constructed for this purpose; then, Section 4 describes the measurements gathered in the three scenarios; finally, Section 5 presents the conclusion obtained from all this work.

## 2. Methodology and Network Design

This section presents the methodology followed in this study, including the signalling system requirements and the protocol stack perspective.

### 2.1. Signalling System Requirements

Conceptually, the wayside signalling systems are located at a fixed location, usually deployed in technical rooms at the main stations, which are generally close to urban areas. These urban areas are where MNOs focus on mobile network deployments.

They transmit messages to each other encapsulated in UDP/IP segments to be transmitted to the physical layer. Nowadays, the most common physical technology used is fibre optical cables. This study presents the results of exchanging this commonly used technology for mobile communication networks based on MNOs.

Table 1 shows the communication requirements for this signalling system. Therefore, to analyse the feasibility of this paper's proposal, it is necessary to measure a set of KPIs that verifies how MNO networks can affect bit rate, latency and jitter, considering the physical layer and application layer response times and timeouts required by the signalling equipment.

**Table 1.** Communication requirements for railway signalling equipment.

Communication Requirements for Signalling Equipment	
Communication protocol	UDP/IP
Message reception timeout	1.8 s
Message sending period	300 ms
Signalling bit rate	4 kpbs
Availability	>99%

Looking at the parameters listed in Table 1, there is very little information on the requirements to fulfil an adequate performance communication for signalling systems. For that reason, a complete characterisation of the communication is included as part of this study. Nevertheless, it is clear that signalling systems are limited by latency and period, with the required data rate not being the bottleneck since 4G and 5G can provide a much higher data rate.

Specifically, the message reception timeout parameter describes the maximum time allowed to send an order, execute it and notify back to the IXL can be 1.8 s, which can be

conditioned by the network round-trip time. It is important to note that this parameter involves mechanical elements on the tracks as part of the task, such as moving a railway point on the track.

Regarding the jitter, this is conditioned by the time of the message sending period. As it is a UDP communication protocol, a jitter greater than 300 ms would cause a notable disorder in the message, and it would be considered a lost message. Moreover, the theoretical bit rate generated by communication between signalling devices is 4 kbps.

### 2.2. Protocol Stack Perspective

Figure 1 shows the standard protocol stack followed in this study to verify the requirements in Table 1, in which the layers marked in light red are the data to be measured in the communication between the IXL and the object controller.

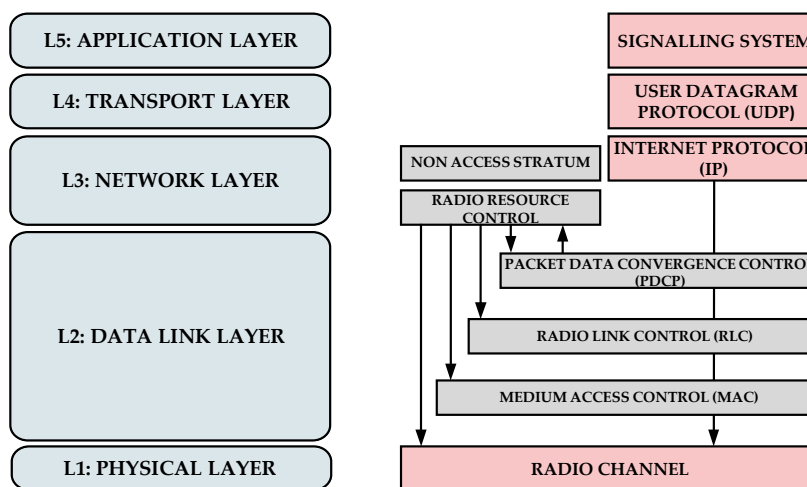


Figure 1. Protocol stack design and testing approach.

In the physical layer, it is necessary to capture parameters that indicate the quality of communication at the radio level to see the correlation with the data in the network and application layers. The parameters for the analysis are RSRP, RSRQ and SINR.

In the network layer, the latency and jitter are the essential parameters [12] since they determine the successful communication rhythm required by the application layer. In the signalling systems, some timeouts are defined to acknowledge the updated and recent information about the progress of the railway operation. This means that if the communication system is not fast enough, the railway application information may be overdue at the application layer, implying a problem in the system’s availability.

## 3. Measurement Set-Up and Prototype

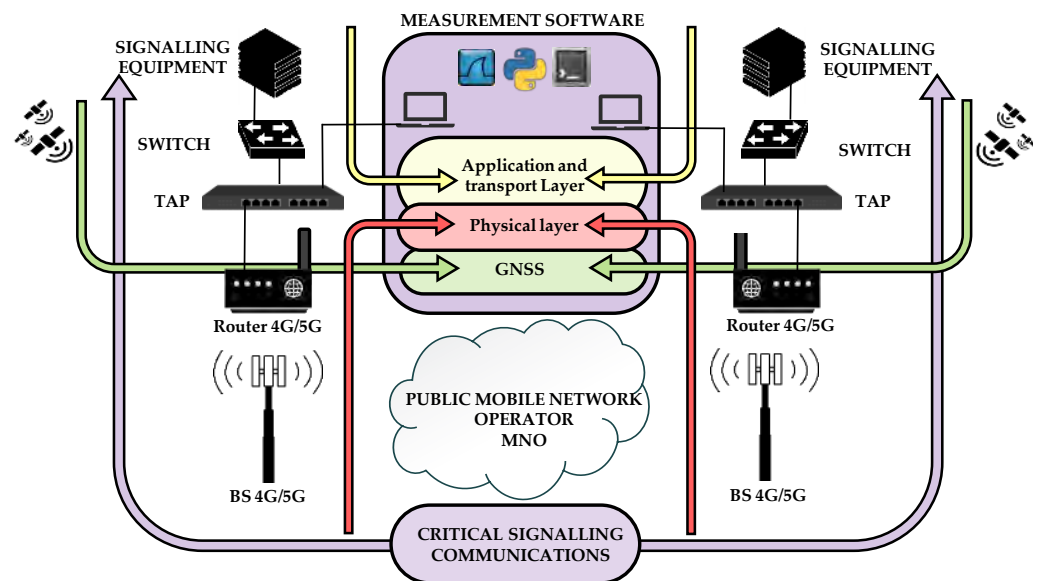
This section presents the prototype hardware architecture, the software developed, and the measurement set-up proposed in this study.

### 3.1. Prototype Architecture

In this area of research for the railway sector, the interests of the companies have just begun to appear. Hence, no commercial tools are available to measure and analyse the overall behaviour of signalling systems using 4G/5G mobile networks. In this study, the goal is mainly to measure the traffic generated between an IXL and an object controller with enough detail to define the radio and network parameters required to provide reliable service to signalling systems. For this reason, this study presents a prototype developed for this purpose, which measures and processes the KPIs from the protocol-stack perspective.

Figure 2 shows the architecture schema of the prototype and the elements to which it is connected. Following Figure 1, the lower layer represents the MNO network; the upper part represents the signalling equipment as the application layer; and, in the middle,

the prototype connects to the MNO and the signalling equipment as an alternative to the fibre optical network acting as the physical and network layer.



**Figure 2.** Prototype and measurement set-up architecture.

The signalling equipment comprises a real object controller and an IXL simulator. Both connect to two E-Lins H900fq-W-G devices, which include 4G/5G modem and routing capabilities. To these components, non-invasive measurement elements are connected based on traffic sniffers and signal meters developed for this purpose.

The MNO network type considered in these study scenarios has been the following:

- Prototype based on commercial equipment as a regular user.
- Prototype based on enterprise solutions with an SLA [13] that guarantees, among other parameters, a maximum latency of 80 ms, a packet loss of 0.2% and a monthly availability of 99.5%.

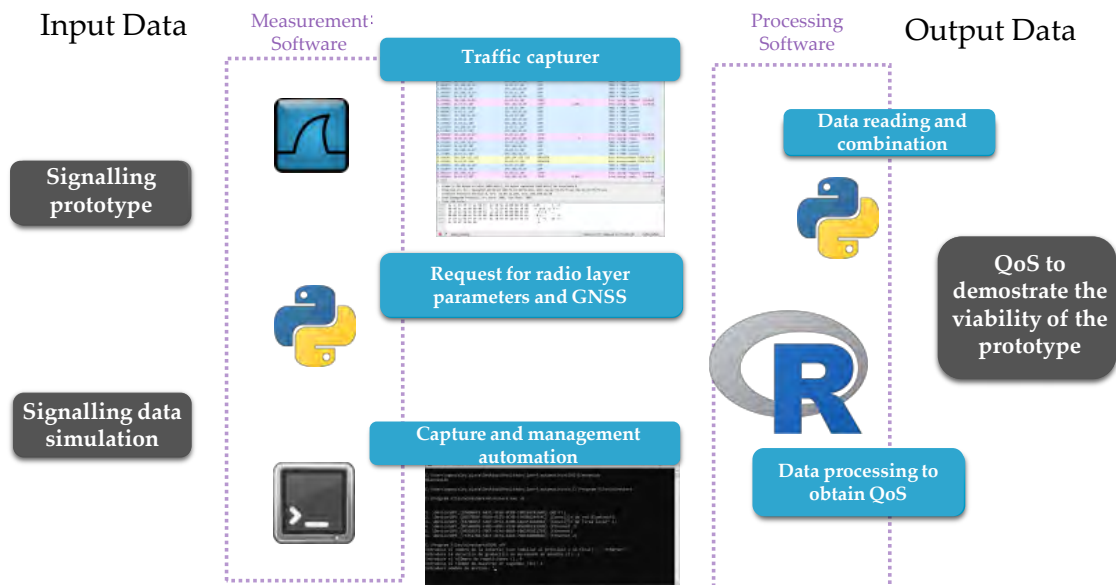
### 3.2. Software Scheme

The software scheme is shown in Figure 3, where the different functions are distributed in modules supported by a set of technologies. This software allows the capture, collection and post-processing of the signals at the physical, network and application levels.

The functions of the software are defined as follows:

- Measurement software: This section is divided into three modules whose purpose is to request network parameters, and capture and save them.
  - Radio and GNSS parameter request module: Developed in Python. It is responsible for requesting, in 1-second intervals, the radio and mobile communication parameters and GNSS parameters, such as speed and geographical coordinates.
  - Data capture module: using Wireshark. The wired interface captures the network, transport and application data, whereas the Wifi interface captures the radio and GNSS data.
  - Measurement software control module: Developed in '.cmd' batch programming, it is responsible for synchronising the two previous modules and saving the data.
- Processing software: Divided into two modules whose purpose is to transform the data and check the quality of the network for signalling services.
  - Data processing module: Developed in Python, it is responsible for transforming the files and filtering the resulting files from the measurement software ('.pcapng') to others ready for analysis.

- Analysis module: Developed in R, it is responsible for visualising the data and generating statistics to qualify the communication.



**Figure 3.** Software-distributed modules architecture.

### 3.3. Scenarios

This section presents the different scenarios in which the study has been carried out to completely characterise the communication behaviour of the proposed system from the protocol–stack perspective to then reproduce this characterisation in a realistic railway environment.

#### 3.3.1. Railway Laboratory Tests

The tests use a mock-up of a real object controller and an IXL simulator. The results show the correlation between the application layer (signalling response time and data rate) and network parameters (bit rate, latency and jitter) according to the signalling system requirements defined in Table 1.

#### 3.3.2. Telecommunications Laboratory Tests

The tests compare the LTE radio network and Non-Standalone (NSA) 5G. The objective is to analyse how the system works in an area with 5G deployment, demonstrating its improvement compared to 4G networks. Likewise, this scenario allows a comparison between SLA and regular users.

Long-term measurements have been carried out, specifically 672 periods of 15 min. The collected data allows the correlations between the radio parameters and the latency to be found according to the signalling communication requirements based on UDP.

#### 3.3.3. Field Railway Tests

The objective of the field tests is to analyse the performance of the proposed system in a realistic railway line.

This test is performed in the railway environment in a low railway density traffic line. The selected location presents a low coverage area, which provides the most restricting option to prove this proposed implementation. This location is between Guardo (Plasencia, Spain) and Mataporquera (Cantabria, Spain).

The Guardo–Mataporquera railway section is a non-electrified single track in the north of Spain with no communication infrastructure deployed nowadays. It follows a route

65 km long, including two main stations (Guardo and Mataporquera stations) and two secondary stations (Santibañez de la Peña and Vado-Cervera stations).

#### 4. Results

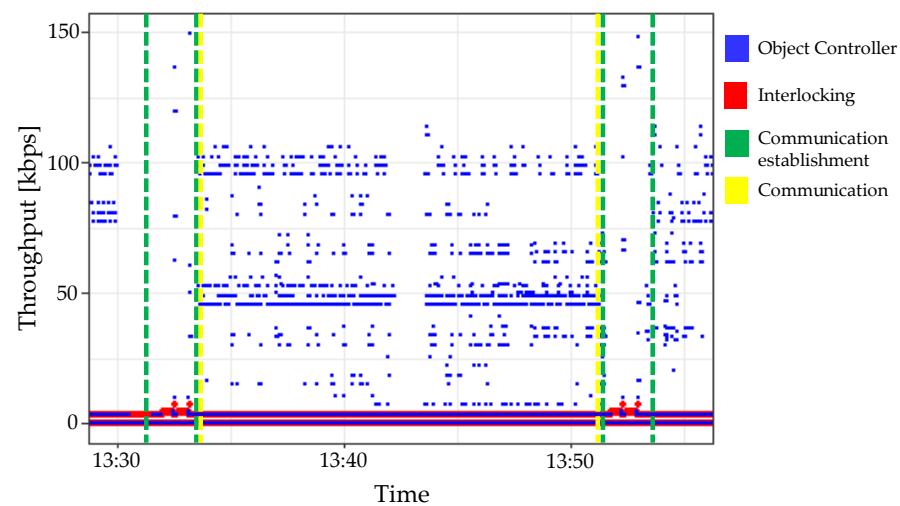
This section describes the results obtained in the tests carried out in the different scenarios presented in Section 3.3. The analysis focuses on the characterisation of critical signalling traffic to later analyse the behaviour of this traffic in a telecommunications laboratory environment. Finally, field measurements evaluate the behaviour in a real environment of low-density railway traffic.

##### 4.1. Signalling Data Traffic Characterisation

This section presents the critical data characterisation for the signalling system.

##### 4.1.1. Bit Rate Characterisation

Figure 4 shows the bit rate transmitted when the signalling equipment performs the following process:



**Figure 4.** Signalling bit rate for a set of tasks.

- Communication establishment: process to establish the communication at the application layer marked between the green vertical lines.
- Signalling tasks marked between the yellow vertical lines:
  - Point supervision: periodic task to supervise the state of the point machine;
  - Trailing: detection of a point between trailers when the train passes.
- Communication failure: communication establishment and progress not performed successfully at the application level while having connected the communication system correctly.

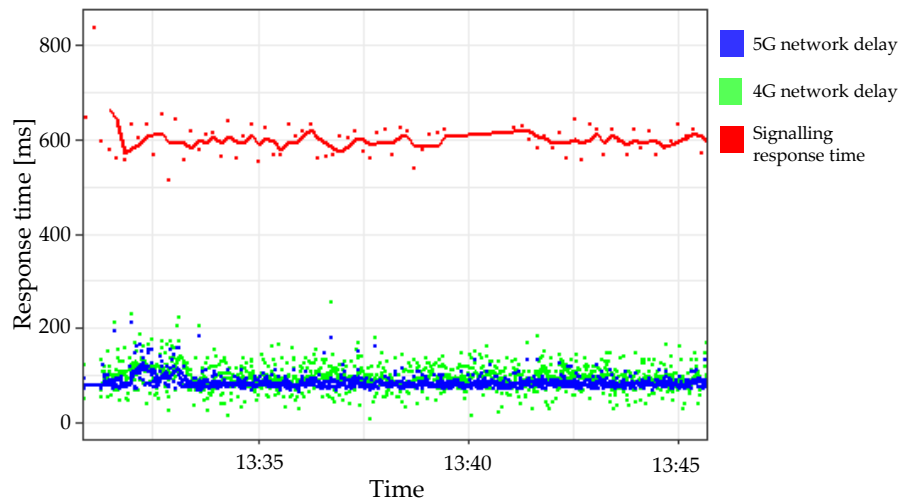
The results show that the bit rate varies according to the performed task. They include measurements with signal levels ranging between  $-75$  and  $-117$  dBm on LTE at 1800 MHz. The overall traffic is around 3.8 kbps, as summarised in Table 2, where the specific amount of data is described according to the signalling equipment involved. There are peaks of 150 kbps when communication is established. Moreover, communication disconnections cause the duplication of the throughput when radio conditions are degraded.

**Table 2.** Network KPIs. Average values measured in the application layer: signalling critical services.

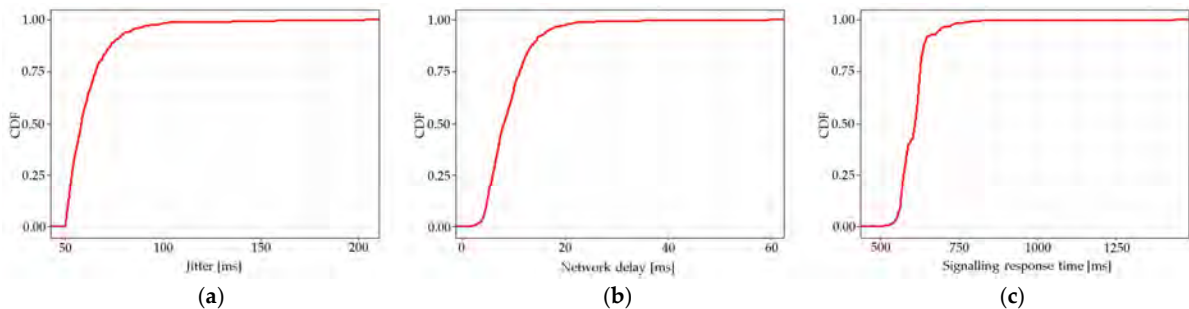
Parameters	Theoretical Value	Average Measured Value
<b>Bit Rate</b>		
Overall bit rate	3.8 kbps	Interlocking:
Trailing tests		Trailing: 2.8 kbps
Supervision tests		Supervision: 3.3 kbps
Signalling comms failure		Failure: 7.5 kbps
		Object Controller:
		Trailing: 2.2 kbps
		Supervision: 4.8 kbps
		Failure: 2.5 kbps
<b>Time</b>		
Signalling layer round trip time	<1800 ms	601 ms
Network delay (Latency)	<500 ms	70 ms
Messages period (Jitter)	300 ms	318 ms

4.1.2. Latency and Jitter

Latency measurements indicate an average message transfer delay of 610 ms, in which 70 ms is dedicated to the network delay (see Figure 5). This means that the prototype provides a reduced network latency of 66.1% compared to the complete communications establishment. Moreover, as Figure 6b shows, the network can provide a delay lower than 150 ms 99% of the time. As a result, the overall signalling response time is lower than 800 ms 99% of the time, as shown in Figure 6c.



**Figure 5.** Signalling and network round trip time.



**Figure 6.** Cumulative density function of network KPIs.

In terms of jitter, the signalling system sends information every 318 ms (communication heartbeat) in UDP. For this reason, if the network jitter exceeds this value, the packets received by the signalling equipment will be out of order, which could cause impairment or even failure in the communication process due to UDP not providing congestion control or reception confirmation. In this case, it has been found that the prototype offers a jitter of less than 40 ms in 99% of cases, which indicates that the packet reception variation margin may still be 86.7% higher than measured, as Figure 6a describes.

In short, the most restrictive network parameter for establishing communications is latency since the signalling equipment requires a message transfer period lower than 1.8 s in a round-trip measurement, as described in Table 1.

#### 4.2. Telecommunication Tests

During these tests, the objective is to assess the different behaviour according to the MNOs' services provision. Along this section, the measurements are performed simulating signalling critical data according to Section 4.1.

##### 4.2.1. 4G and 5G Characterisation

Figure 7 shows the comparison between 4G and 5G networks at physical and network layers. It describes the cumulative density function of each measured value for RSRP, RSRQ and SINR according to the network latency. This result makes it possible to determine the KPIs to guarantee the proper working of the critical services considering the signalling data characterisation. These KPIs are summarised in Table 3, including the latency obtained 99% of the measured time.

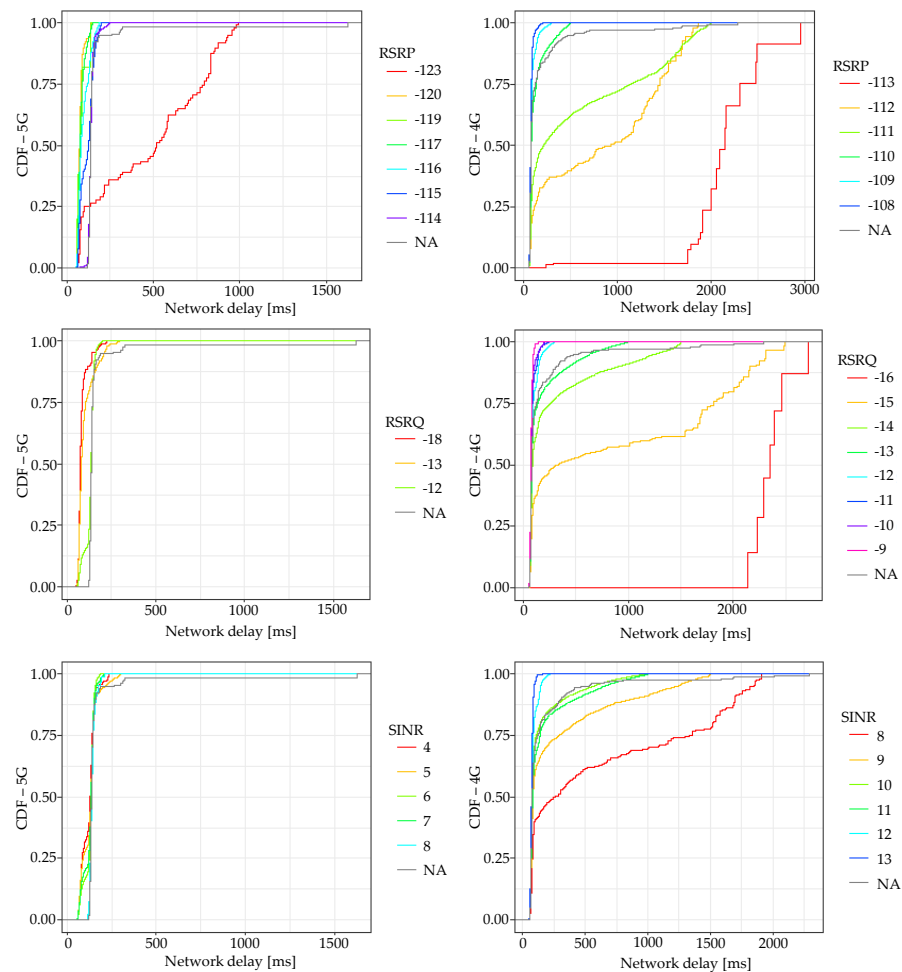


Figure 7. RSRP, RSRQ and SINR measured CDF for 4G (right) and 5G (left).

**Table 3.** Radio KPIs. 4G/5G radio threshold values to guarantee availability 99% of the time for a latency lower than 500 ms.

Parameter	LTE (4G)		5G NSA	
	Radio	Latency	Radio	Latency
RSRP	−109 dBm	300 ms	−120 dBm	150 ms
RSRQ	−12 dB	300 ms	No minimum value obtained	
SINR	10 dB	220 ms	No minimum value obtained	

Considering the KPIs in Table 1, the maximum network round-trip time is set to a threshold of 500 ms (50% margin over the maximum gap measured of 1 s). Figure 7 shows that the RSRP shall be greater than −109 dBm for a 4G network, whereas the NSA of 5G allows a decrease down to −120 dBm.

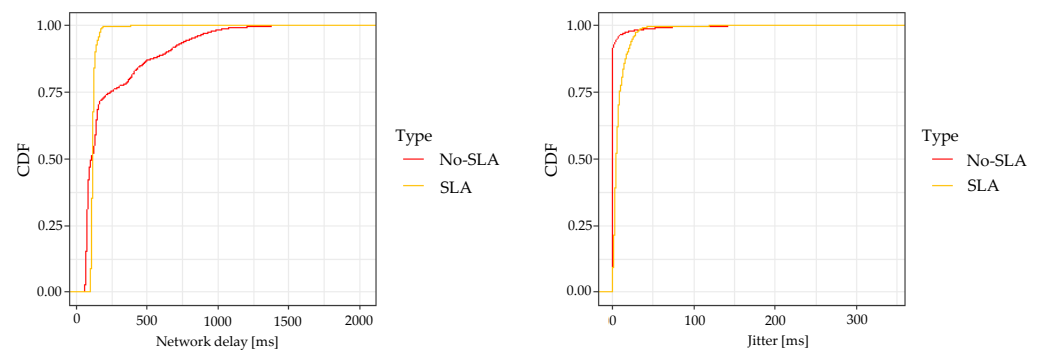
Moreover, it is also clear how the system is more stable as the signal levels increase. In terms of availability, an RSRP of −108 dBm provides a latency lower than 200 ms 99% of the time versus −109 dBm, which guarantees a threshold of 300 ms.

Following similar reasoning, RSRQ and SINR can go down to −12 and 10 dB, respectively, for 4G networks. Although in the 5G NSA network, no minimal values have been found for these KPIs, the SINR of 4 dB provides adequate performance of the transmission data, and RSRQ can provide satisfactory quality service with −13 dB. This result shows a significant improvement in comparison to 4G networks.

This study shows the minimal values to obtain sufficient signal levels to provide the required network parameters. However, in a process design, more restrictive values should be selected in order to increase the probability of fulfilling the requirements more often.

#### 4.2.2. Comparison between a Regular User and Enterprise Solution with SLA

Figure 8 shows the latency considering an MNO contract with SLA and as a regular user.

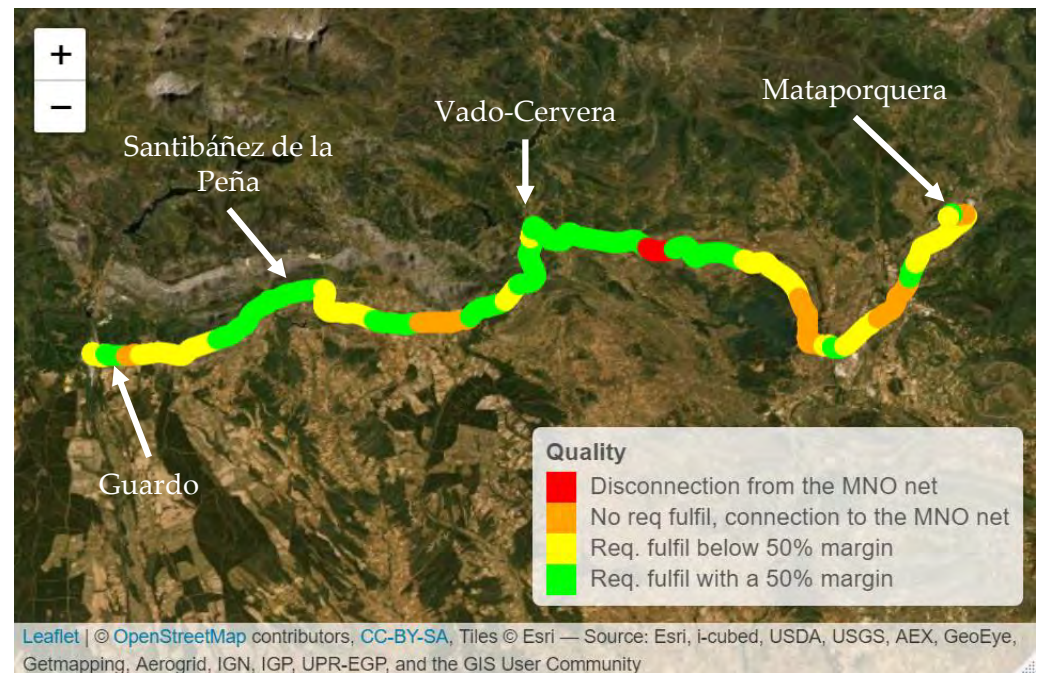
**Figure 8.** MNO network performance (latency and jitter) according to SLA agreement and a regular user.

The results show similar average latency along the network. However, there is substantially more stability for the SLA case. This is because the SLA grants priority over the network. Therefore, as the figure shows, its availability increases in latency. In contrast, the jitter results are very similar both cases.

#### 4.3. Field Measurements

Figure 9 shows the KPI test along the Guardo–Mataporquera section according to the network and radio KPIs shown in Tables 2 and 3, respectively. The green and orange colours show the areas where all these KPIs are fulfilled. The former includes locations with a margin greater than 50% of the requirements, whereas the latter does not necessarily provide this margin. In the figure, the yellow colour shows the locations where the connection to the MNO is alive (see Table 3 KPIs) with any network parameters not

fulfilled (degraded condition case). Finally, the red areas show no connection at all to the MNOs.



**Figure 9.** Field measurements along the Guardo–Mataporquera section from Guardo–Balmaseda Railway Line.

These measurements only show LTE developments since, in the selected area, there is no 5G deployment at the moment. This is the case with most of the low railway density traffic currently, showing more realistic results. Moreover, as shown in Section 4.2.1, the worst-case scenario is for 4G networks, as 5G allows more restrictive radio parameters.

The results show a good performance along the whole line except for a short area in a remote area. Focusing on the stations, the KPIs' success rate increases to be included in the green areas for the four stations. This means that these field measures validate the hypothesis of implementing the proposed solution along this railway line as they fulfil the network and radio KPIs, presenting a 50% additional performance of all these parameters at the stations. Moreover, it is also a relevant result that the MNO covers most of the railway section.

## 5. Conclusions

Signalling communications have been established through public telecommunications networks via MNOs for railway signalling critical data using 4G and 5G networks. The results demonstrate that the hypothesis is fulfilled since communications between signalling devices based on the prototype can provide the quality of service required in terms of the physical and network layers. The study shows a characterisation of 4G and 5G radio networks, obtaining a non-linear correlation between the signal level parameters and the latency offered by the MNO mobile network. At the KPI level, this study shows how the prototype provides a maximum of 150 ms 99% of the time for low radio values of  $-109$  dBm in 4G and  $-120$  dBm in 5G networks, considering the 500 ms latency threshold allowed for this service. At the system level, it is observed that this system can be extended to the whole signalling system (field elements-IXL, OCC-IXL, among others).

**Author Contributions:** Conceptualization, A.G.-P. and R.G.C.; Data curation, R.B.A.B.; Funding acquisition, R.G.C.; Investigation, A.G.-P. and R.B.A.B.; Project administration, A.G.-P. and R.G.C.; Software, R.B.A.B.; Supervision, C.B.R.; Validation, C.B.R.; Writing—review & editing, A.G.-P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by Ineco thanks to its Innovation Department under the scope of the 5siG innovation project carried out during the years 2020–2021.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

**Data Availability Statement:** Data presented is original and not inappropriately selected, manipulated, enhanced, or fabricated.

**Acknowledgments:** The authors would like to thank Thales for the collaboration in the project grating the railway signalling equipment from the Thales laboratory and Adif for allowing these measurements along Guardo–Balmaseda Railway Line. This study is aligned with the plan of deletion of Telephonic Block along approximately 3000 km along the Spanish railway lines.

**Conflicts of Interest:** The authors declare that there are no conflict of interest regarding the publication of this paper.

## Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

4G	Fourth-generation mobile communications
5G	Fifth-generation mobile communications
CCTV	Closed Circuit Television
CDF	Cumulative Distribution Function
dB	Decibel
dBm	Decibel-milliwatts
DL	Downlink
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSM-R	Global System for Mobile communications - Railway
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITS	Intelligent Transport Systems
IXL	Interlocking
kbps	Kilobits per second
KPI	Key Performance Indicator
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Network
MCPTT	Mission Critical Push-To-Talk
MNO	Mobile Network Operator
MTC	Machine Type Communications
ms	Milliseconds
NSA	Non-Standalone
ObjC	Object Controller
OCC	Operation Control Center
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PDCP	Packet Data Convergence Control
RLC	Radio Link Control
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SLA	Service Level Agreement
TAP	Terminal Access Point
UDP	User Datagram Protocol
UL	Uplink

## References

1. Berbineau, M.; Behaegel, R.; Garcia-Loygorri, J.M.; Torrego, R.; D'Errico, R.; Sabra, A.; Yan, Y.; Soler, J. Channel Models for Performance Evaluation of Wireless Systems in Railway Environments. *IEEE Access* **2021**, *9*, 45903–45918. [[CrossRef](#)]
2. Zhong, G.; Xiong, K.; Zhong, Z.; Ai, B. Internet of things for high-speed railways. *Intell. Conver. Netw.* **2021**, *2*, 115–132. [[CrossRef](#)]
3. Mullner, R.; Ball, C.F.; Ivanov, K.; Treml, F.; Spring, G. Quality of service in GPRS/EDGE mobile radio networks. In Proceedings of the 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference, Milan, Italy, 17–19 May 2004; Volume 5, pp. 2507–2511.
4. González-Plaza, A.; Calvo-Ramírez, C.; Briso-Rodríguez, C.; García-Loygorri, J.M.; Oliva, D.; Alonso, J.I. Propagation at mmW Band in Metropolitan Railway Tunnels. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* **2018**, *2018*, 7350494. [[CrossRef](#)]
5. Chettri, L.; Bera, R. A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems. *IEEE Internet Things J.* **2020**, *7*, 16–32. [[CrossRef](#)]
6. Arriola, A.; Rodríguez, P.M.; Val, I.; Briso, C.; Gonzalez-Plaza, A.M.; Moreno, J.; Echeverría, E.; Goikoetxea, J. Characterization of an Outdoor-to-Indoor wireless link in metro environments at 2.6 GHz. In Proceedings of the 2017 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Warsaw, Poland, 29–31 May 2017; pp. 1–4.
7. He, D.; Ai, B.; Guan, K.; Zhong, Z.; Hui, B.; Kim, J.; Chung, H.; Kim, I. Channel Measurement, Simulation, and Analysis for High-Speed Railway Communications in 5G Millimeter-Wave Band. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2018**, *19*, 3144–3158. [[CrossRef](#)]
8. Sarfaraz, A.; Hämmäinen, H. 5G Transformation: How mobile network operators are preparing for transformation to 5G? In Proceedings of the 2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks, Copenhagen, Denmark, 23–24 November 2017; pp. 1–9. [[CrossRef](#)]
9. Shah, S.P.; Pattan, B.J.; Gupta, N.; Tangudu, N.D.; Chitturi, S. Service Enabler Layer for 5G Verticals. In Proceedings of the 2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF), Bangalore, India, 10–12 September 2020; pp. 269–274.
10. Gonzalez-Plaza, A.; Moreno, J.; Val, I.; Arriola, A.; Rodriguez, P.M.; Jimenez, F.; Briso, C. 5G communications in high speed and metropolitan railways. In Proceedings of the 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, France, 19–24 March 2017; pp. 658–660.
11. Leles, R.D.C.D.; Rodrigues, J.J.P.C.; Woungang, I.W.; Rabel, R.A.L.; Furtado, V. Railways Networks—Challenges for IoT Underground Wireless Communications. In Proceedings of the 2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), Guadalajara, Mexico, 14–16 November 2018; pp. 1–6.
12. Du, K.X.; Carrozzo, G.; Siddiqui, M.S.; Carrasco, O.; Sayadi, B.; Lazarakis, F.; Kourtis, A.; Sterle, J.; Bruschi, R. Definition and Evaluation of Latency in 5G: A Framework Approach. In Proceedings of the 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF), Dresden, Germany, 30 September–2 October 2019; pp. 135–140.
13. Chounos, K.; Apostolaras, A.; Korakis, T. A Dynamic Pricing and Leasing Module for 5G Networks. In Proceedings of the 2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF), Bangalore, India, 10–12 September 2020; pp. 343–348.

## Research Article

# Propagation at mmW Band in Metropolitan Railway Tunnels

Ana González-Plaza <sup>1</sup>, César Calvo-Ramírez,<sup>1</sup> César Briso-Rodríguez <sup>1</sup>,  
Juan Moreno García-Loygorri,<sup>1</sup> David Oliva,<sup>2</sup> and José I. Alonso<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, ETSIS de Telecomunicación,  
Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

<sup>2</sup>Departamento de SSR, ETSI de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

Correspondence should be addressed to Ana González-Plaza; [gonzalezplaza.ana@gmail.com](mailto:gonzalezplaza.ana@gmail.com)

Received 3 November 2017; Revised 17 January 2018; Accepted 14 February 2018; Published 26 March 2018

Academic Editor: Eva Antonino-Daviu

Copyright © 2018 Ana González-Plaza et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The next generation of mobile communications, 5G, will provide a wideband network based on microwave and millimeter-wave (mmW) communication radio links with the goal of fulfilling the strict and severe requirements of the future test cases. In particular, this paper research is focused on mmW bands in metropolitan railway tunnels. For that purpose, a propagation measurement campaign was performed at 24 GHz band in a passenger train on a realist subway environment, and these results were combined with simulations ad hoc for tunnels and a theoretical modal propagation model. A narrowband and a wideband study have been conducted with the aim of obtaining the path loss, fading, power-delay profile, and angle of arrival, taking into consideration horizontal and vertical polarization in the receiving and transmitting antennas. This validation can be used to design and deploy wideband mobile communication networks at mmW bands in railway scenarios.

## 1. Introduction

The anticipated increase in demand for data traffic is one of the key requirements of the upcoming years in mobile communication technologies. The fifth generation (5G) aims to provide considerable broader bandwidths and a network capable of offering a flexible technology for very different cases studies [1].

In this context, 5G could be the most disruptive technology in railways since it can allow the addition of new services and applications that make railway a more efficient, safer, and profitable transportation option [2].

However, there are important challenges to overcome: The first one is to provide a wideband service for the plenty of passengers who will demand a large capacity. The second one is the critical signalling control applications which will require very high quality of service and moderate data rate to allow real-time applications such as high definition video for automatic driving and surveillance [3, 4].

In the case of signalling, current railway mobile communication systems such as GSM-R are not able to provide such ambitious features [5]. For this reason, LTE-R and

future 5G are being examined as new railway communication technologies. In the latter, 3GPP new radio (NR) system for 5G proposes a large spectrum solution from bands under 6 GHz to 100 GHz [6]. Among all, millimeter-wave (mmW) bands, particularly from 24 to 33 GHz, are considered as a suitable option to establish mobile communication services in high-speed scenarios. This band has been chosen because it is an industrial scientific and medical band (ISM), which can be used for railway communications. In fact, 28 and 37 GHz have been already licensed in the USA and 26 GHz band in China and Europe [7].

The study of electromagnetic field propagation in the different specific scenarios of the railway environment is a key prerequisite in order to succeed in the design and installation of these mobile communication systems. In this sense, mmW communications in tunnels offer some interesting features over lower frequency bands for communications in tunnels [8].

- (i) Electromagnetic discharges of catenary pulses, usual in tunnels, have little influence on millimeter-wave propagation.

- (ii) Losses produced by reflection and refraction of electromagnetic waves at mmWs are relatively small.
- (iii) Very wide bandwidth is available.
- (iv) Latency reduction is achieved.

Nevertheless, an assessment of the propagation channel is a mandatory requirement to ensure reliable communication links. For that reason, although there is already some literature on mmW measurements in tunnels at 30 GHz [9], 38 GHz [10], 60 GHz [11], and 240 GHz [12] bands, there are no measurements in a realistic railway environment.

This paper focused its research on the propagation at 24 GHz frequency band in realistic metropolitan railway tunnels. For that purpose, three methods have been applied. Firstly, a modal propagation model has been described and put into practice; then, a ray tracing (RT) simulator developed specially for propagation in tunnels has been employed; and, finally, measurements in a passenger train on a realist subway environment have been performed.

The goal of this study is to present an accurate path loss model at 24 GHz directly applicable to railway communication systems and to show meaningful results for wideband simulations to assess the possibility of using mmW for communication systems in metropolitan railway tunnels.

This analysis presents some results regarding the path loss and the fading, power-delay profile (PDP), and angle of arrival (AoA) along a tunnel, taking into account horizontal and vertical polarization in the receiving and transmitting antennas.

This document is organized as follows: firstly, in Section 2, a theoretical attenuation modal model and the 3D RT technique used by the simulator are explained; secondly, Section 3 describes *Raylway* simulation tool and the parameters configured for this experiment in the real environment and in the simulator; afterwards, in Section 4, all the results are enumerated: path loss model and  $K$  factor in Section 4.1 and PDP and AoA in Section 4.2; finally, Section 5 presents the conclusion obtained from all this work.

## 2. Modeling and Simulation of Guided Propagation in Tunnels

In the past, the modal theory has been widely applied to study the propagation in tunnels due to it provides suitable results. However, this method does not take into account the effect of arbitrary geometries in walls, roughness, discontinuities, among others. For that reason, nowadays, RT methods are employed to obtain more accurate propagation models [13].

**2.1. Modal Analysis.** Modal analysis is a classical technique for studying propagation channel in tunnels where there is waveguide effect. It is based on the concept that the signal attenuation in this kind of scenarios depends on the electromagnetic modes propagating within the tunnel. As the cross-section area of the tunnel is quite large in comparison to the signal wavelength, there are many modes propagating through this channel. Nevertheless, the modes suffer gradual extinction as they travel along the environment up to the

breakpoint,  $Z_{NF}$ , where the modes are sufficiently attenuated and it can be considered that only the first mode propagates.

$$Z_{NF} \approx \max\left(\frac{a^2}{\lambda}, \frac{b^2}{\lambda}\right), \quad (1)$$

where  $a$  and  $b$  are the horizontal and vertical dimension of the tunnel, respectively, and  $\lambda$  is the signal wavelength.

These two regions are defined as near-field and far-field regions. On the one hand, the near-field region represents the zone where the field amplitude suffers strong fading and fast losses obtained from the contribution of many rays propagating from different grazing angles with high losses. On the other hand, the far-field region is where the relation between the first mode and the rest is high enough to neglect the effect of the other modes.

As [14] explains in detail, the energy contained in the transmitted signal propagating through the tunnel is divided into several modes. Each of them is attenuated following different decay. The overall path loss can be simplified by considering that each mode has an independent power from the others. Therefore, the total received power is approximately the sum of all modes' power. This supposition is based on the fact that modes are closely orthogonal.

Assuming this situation, the loss expression of each mode can be approximated for horizontal and vertical polarization,  $\alpha(m, n)^{h,v}$ , considering the tunnel as a rectangular waveguide.

$$\alpha(m, n)^v = 4.343\lambda^2 \left( \frac{m^2}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r_1} - 1}} + \frac{n^2 \epsilon_{r_2}}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r_2} - 1}} \right), \quad (2)$$

$$\alpha(m, n)^h = 4.343\lambda^2 \left( \frac{m^2 \epsilon_{r_1}}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r_1} - 1}} + \frac{n^2}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r_2} - 1}} \right),$$

where  $\alpha(m, n)^{v,h}$  are the attenuation of each mode in dB/km in vertical ( $v$ ) and horizontal ( $h$ ) polarization for the  $m, n$ th mode;  $\epsilon_{r_1, r_2}$  are the relative permittivity of the vertical and horizontal walls, respectively. This model can be also applied to arched tunnels by adjusting the cross-section dimensions [15].

As the equations in (2) show, tunnels dimensions are directly related to the attenuation that every mode suffers. Thus, the greater the tunnel cross-section is, the smaller the attenuation experienced by the modes is. This is because losses are inversely proportional to the cube of tunnels height and width.

With this propagation constant, the overall attenuation for both polarization directions,  $L_{mn}^{v,h}$ , at a certain distance, ( $z$ ), considering losses as the rms contribution of modes for both polarization directions is the following:

$$L_{mn}^v(z) = 10 \log_{10} \left[ \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^N 10^{(10 \log_{10}(z) + \alpha(m, n)^v)/10} \right], \quad (3)$$

$$L_{mn}^h(z) = 10 \log_{10} \left[ \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^N 10^{(10 \log_{10}(z) + \alpha(m, n)^h)/10} \right],$$

where  $M$  and  $N$  are the last modes taken into account.

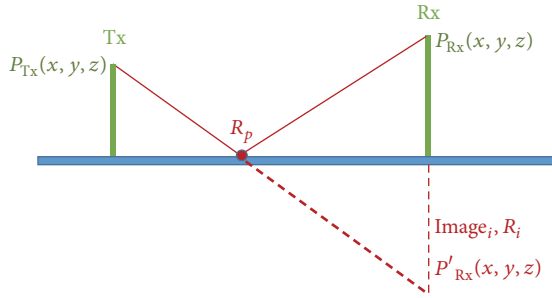


FIGURE 1: The image method.  $R_i$  with respect to the ground plane.

In addition to this, losses are directly proportional to the square of the order of the modes, so that higher modes experience stronger attenuation. In fact, we can consider that, from a certain distance, all high order modes have been extinguished and only the fundamentals remain.

However, the modal propagation model does not take into account tilt losses, which are more important in semicircular tunnels and must be adjusted carefully for each tunnel, or wall roughness in tunnels, which might produce scattering of the signal. That is why simulations using RT technique are performed to obtain more accurate results.

**2.2. Ray Tracing Technique.** This simulator uses the novel technique of 3D ray tracing which is based on a geometrical optics method to compute the propagation channel of the modeled environment. It is an accurate and versatile propagation prediction tool for different kind of scenarios [16]. It uses a deterministic channel model which requires an exact knowledge of the geometrical and electromagnetic description of the environment. For that reason, the accuracy of RT comes up with a high computational complexity, which directly scales with the number of propagation paths considered. Nevertheless, it has great advantages as, on the one hand, it allows really detailed modeling, and, on the other hand, with this technique, it is possible to calculate wideband information such as PDP or AoA of the rays.

Tunnels are modeled as a triangular solid mesh made of different materials whose dielectric properties are defined according to the carrier frequency. As this is a 3D RT, reflections on the ceiling and ground are taken into account. This provides more accurate prediction results compared with conventional 2D models.

Using the images method, reflections are calculated in order to obtain the propagation paths. This method consists of basically converting an electric field into an equivalent one easier to compute. In certain cases, it is possible to replace a conductor with one or more point loads. Thus, conductor surfaces are replaced by equipotential surfaces with equivalent potentials.

As Figure 1 shows, having the location of Tx and Rx, the reflection point,  $R_p$ , coincides with the intersection between the obstacle and the segment joining the Tx with the image of the receiver,  $R_i$ . Therefore, the ray follows a straight line from Tx to  $R_p$  and, then, another straight line from  $R_p$  to Rx. It is possible to extend this method to obtain the paths with

multiple reflections. Finally, the received signal,  $E_r$ , is the sum of all the rays that arrived at Rx, as follows:

$$E_r = \left| \sum_i E_i(d = d_{rx}) \right|, \quad (4)$$

$$E_i(d) = E_0 \rho_{tx} \rho_{rx} L_i(d) \prod_p^N [\Gamma(\phi_{pi}) T(\phi_{pi})] e^{-j2\pi d/\lambda},$$

where  $E_i(d)$  is the  $i$ th ray electric field along the distance;  $d_{rx}$  is the distance between the transmitter and the receiver;  $E_0$  is the amplitude of the electromagnetic field;  $\rho_{tx}$  and  $\rho_{rx}$  are the radiation pattern of the transmitter and receiver antenna, respectively;  $L_i(d)$  is the path losses for  $i$ th ray component at a distance  $d$ ;  $\Gamma(\phi_{ji})$  and  $T(\phi_{pi})$  are the reflection and transmission coefficient of the  $p$ th reflection of the  $i$ th component, respectively;  $N$  is the maximum reflections taken into account; and  $e^{-j2\pi d/\lambda}$  is the phase factor due to the travelled distance.

Besides, this simulator calculates the power-delay profile which is a temporal representation of the pulse widening. The instantaneous impulse response [17],  $h(t, \tau)$ , is function of the time,  $t$ , and the propagation delay,  $\tau$ . The power-delay profile, PDP( $\tau$ ), is described by (5) when the channel satisfies the wide sense stationary uncorrelated scattering assumption [18].

$$\text{PDP}(\tau) = \langle |h(\tau, t)|^2 \rangle. \quad (5)$$

Lastly, the angle of arrival is a method for obtaining the propagation direction of a radio-frequency wave incident on a virtual array antenna. The direction is determined by measuring the received signal in each of the elements of the virtual array. This difference in phase is measured by receiver nodes  $R, A_1$ , as follows:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (d_{RA_2} + d_{A_1A_2} + d_{TA_1} - d_{TR}), \quad (6)$$

where  $R$  is the receiver position with its separated virtual elements  $A_1$  and  $A_2$  and  $T$  represents the position of the transmitter.

Hence, the use of 3D-RT technique allows the detailed study of the behavior of wideband channel.

### 3. Simulation and Measurement Set-Up

**3.1. Simulation Tool.** Simulations are performed using *Raylaw: Radio Propagation Simulator for Tunnels* tool, which calculates the radio signal propagation along different tunnel environments. The software, developed in Java and Matlab, allows the user to design and set up the tunnel in order to analyze the propagation in a specific environment. Correspondingly, *Raylaw* software brings the received power, the power-delay profile, and the angle of arrival.

This simulator allows users to set up several parameters in order to obtain results according to the tunnel under study:

- (i) tunnel: definition of the different cross-section types plus their shape and the longitudinal section and wall material properties;

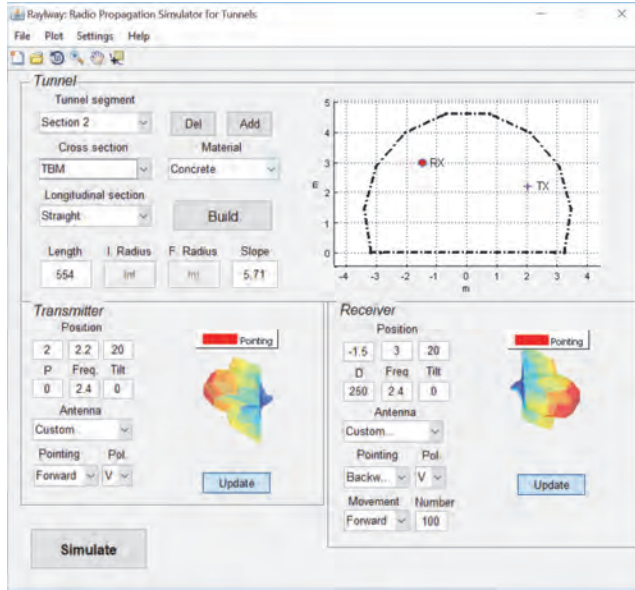


FIGURE 2: Simulator user interface with set-up parameters.

- (ii) transmitter: initial fixed position, frequency, and transmitted power;
- (iii) receiver: initial position, frequency, and distance travelled;
- (iv) antennas: radiation pattern of each antenna, polarization, and relative position between them;
- (v) simulation settings: number of simulation points, maximum number of each ray reflections, and possibility of enabling diffraction.

**3.2. Simulation Set-Up.** Rayway user interface is presented in Figure 2 where the set-up parameters are shown, in this case, for vertical polarization; however, except the polarization, the same values are maintained for the horizontal polarization. The resulting set-up simulation scenario is shown in Figure 4.

**3.3. Measurement Set-Up.** In this section, the measurement set-up in a realistic subway tunnel is explained in detail.

This experiment was conducted in a subway tunnel of Metro de Madrid. Figure 3(b) illustrates the scenario with its more important elements. The set-up parameters are enumerated in Table 1.

On the one hand, the transmitter (Tx) is situated in a fixed position between one station and the tunnel; on the other hand, the moving receiver (Rx) module is located on the windshield of the train. The same antenna model is used in the Tx and Rx equipment. It is a horn antenna of Vector Telecom with model number VT260SGAH15 [19] which covers the frequency range from 21.7 GHz to 33 GHz. Its radiation pattern provided at 23.96 GHz is shown in Figure 5. The gain is a 15.2 dBi and the half power beamwidth is  $28.3^\circ$  in  $E$ -plane and  $27.9^\circ$  in  $H$ -plane.

The tunnel has an arched type tunnel which can be approximately modeled as an equivalent rectangular cross-section since there is a slight adaptation of the dimensions,

TABLE 1: Set-up parameters.

Frequency	24.2 GHz
Transmitted power	5.4 dBm
Tx signal	Continuous wave
Tx and Rx antenna	Horn antenna, 15.2 dBi
HPBW antenna	$E$ -plane $28.3^\circ$ $H$ -plane $27.9^\circ$
Antenna polarization	Horizontal and vertical
Tunnel cross-section	Arched
Tunnel dimensions	6.9 m $\times$ 4.9 m
Train speed	5 km/h

according to [15]. To apply the modal propagation model described in Section 2.1, in this case, the dimensions are 6.9 m  $\times$  4.9 m with a radius of 2.2 m, as Figure 3(a) shows. The assessed route follows a straight line of 350 m with a minor slope of 5.7%. The point 0 represents where the Tx is situated.

This train moves along the railway up to 350 m at a constant speed of 5 km/h.

## 4. Results

In this section, both modal analyses and RT technique together with measurement conducted in a real metropolitan railway tunnel are applied with the aim of assessing the propagation in this particular environment at 24 GHz band.

The analysis is focused on the path loss model, fast-fading, power-delay profile, and angle of arrival.

**4.1. Narrowband Analysis.** This section provides a comparison between measurements, simulation, and modal propagation model for vertical and horizontal polarization. For that purpose, two experiments were performed: the first one with vertical polarization in both antennas and the second one with horizontal polarization. The train follows the exact same route in both experiments; likewise, two simulations were performed with the different polarization directions; and, finally, the theoretical modal losses are shown in order to compare these different approaches.

**4.1.1. Path Loss Model.** The attenuation suffered by a signal can be described through a path loss model defined by (7). The main parameters are derived from the following measurements conducted in a real environment:

$$A(d) = A(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma, \quad (7)$$

where  $A(d_0)$  is attenuation in a reference distance  $d_0$ ,  $n$  represents the loss exponent, and  $\chi_\sigma$  denotes a zero-mean random variable of standard deviation  $\sigma$  which follows a Gaussian distribution.

Figure 6 presents the received power of the empirical data, the simulation result, the theoretical modal model, and the resulting path loss model for the vertical, Figure 6(a), and horizontal, Figure 6(b), experiments, respectively.

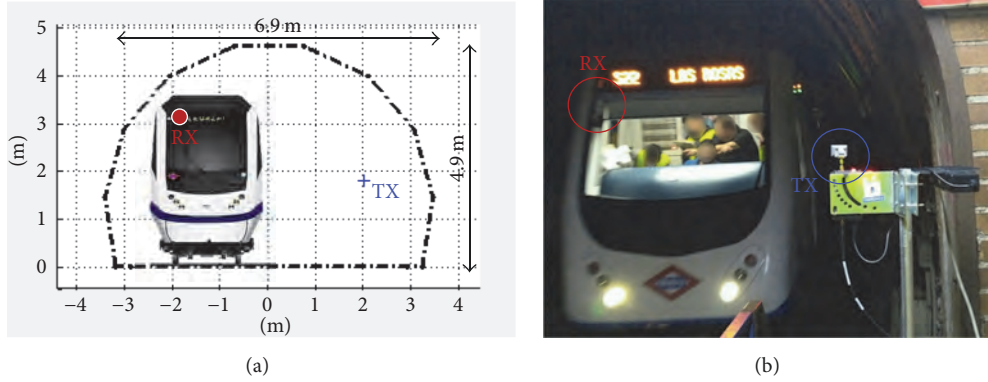


FIGURE 3: (a) Tunnel cross-section dimensions and shape. (b) Measurement scenario: fixed position of Tx at the beginning of the tunnel and moving Rx at the windshield of the train.

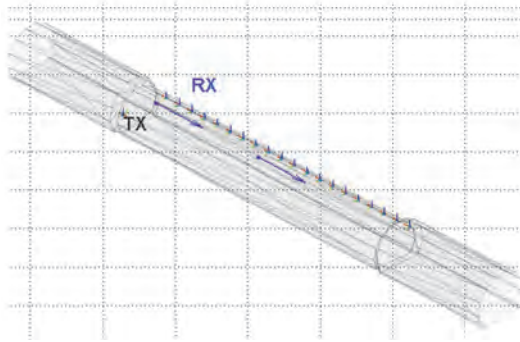


FIGURE 4: Simulation set-up scenario with fixed Tx (in black) and moving Rx (in blue).

Since the antennas are highly directive, as Figure 5 shows, the losses caused by the misalignment of the antenna are very high for distances lower than 20 m. In addition to that, RT simulations have a strong dependency of the number of reflections for short distances. Hence, the simulation results are not accurate and the first 20 m has been removed from Figure 6.

In both experiments, the measurements expose a loss exponent,  $n$ , equal to 1.3 approximately, which is lower than the decay of the free space. Besides, as [20, 21] explains, regardless the type of tunnel, loss exponents are always lower than the free space. This is due to waveguide effect produced in tunnels.

The curve obtained from the modal analysis presents a similar attenuation since the loss exponents are 1 for vertical and 1.1 for horizontal polarization. This shows a significant effect of the modal propagation. Likewise, simulation results are slightly greater than the one acquired by the measurements since the loss exponent is 1.8 for vertical and 1.9 for horizontal polarization. These results are summarized in Table 2.

The differences between models may be produced because, on the one hand, in the modal model just the losses caused by the reflections are taken into account, and, on the other hand, in the case of the RT simulations, the maximum

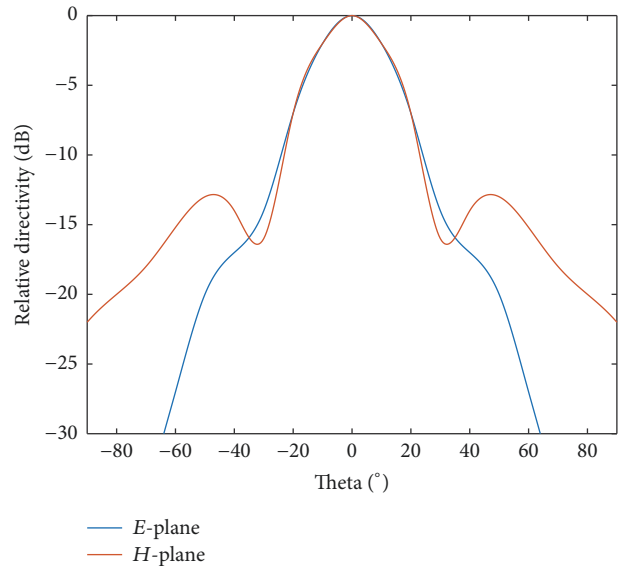


FIGURE 5: Horn antenna radiation pattern.

TABLE 2: Path loss model parameters at the vertical and horizontal polarization directions.

	Vertical	Horizontal
Ref. attenuation, $A(d_0)$	64.8 dB	62.9 dB
Measurement $n$	1.28	1.29
Simulation $n$	1.8	1.9
Modal propagation model $n$	1	1.1
Measurement $\chi_\sigma$	1.4 dB	1.3 dB
Simulation $\chi_\sigma$	1.2 dB	0.9 dB

The attenuation is at the reference point,  $d_0$ , of 20 m.  $A(d_0)$  is referred to the parameters in (7), as  $n$  and  $\chi_\sigma$ .

number of reflections used is limited to six which seems to be not enough to calculate a more accurate model; nevertheless, after some distance, the results converge when the reflections are high enough, as Figure 7 shows.

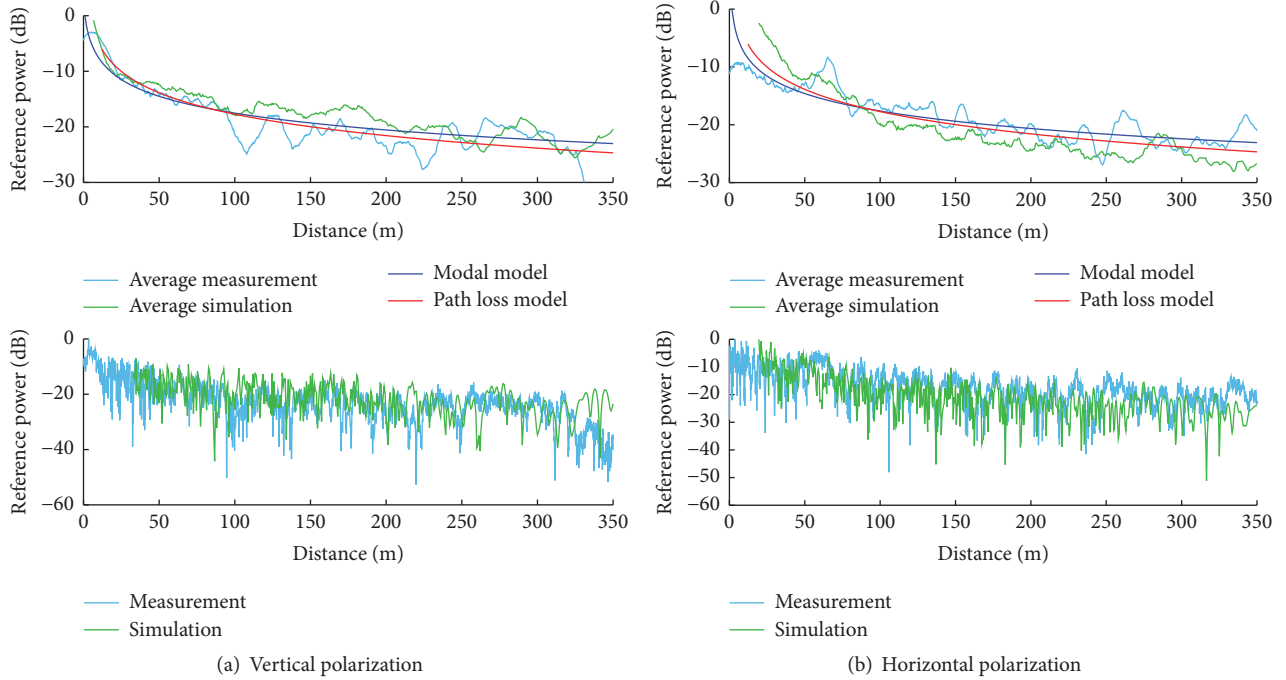


FIGURE 6: Comparison between measurements, simulation, and modal model for vertical and horizontal polarization.

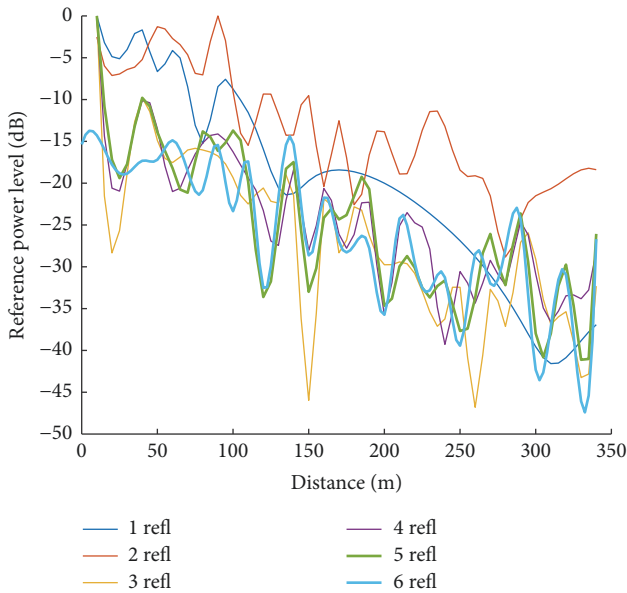


FIGURE 7: RT Simulation results for different number of each ray's reflections.

Nevertheless, in all the cases, the loss exponents are lower than those in the free space which show a clear waveguide effect. This is because the electromagnetic waves are repeatedly reflected in the tunnel's walls. As concrete is made of conductor materials (among others) the reflection coefficient is high. For that reason, the waves are confined to the dielectric by almost total internal reflection at its surface.

At mmW bands, a large number of modes are propagated through the tunnel. Particularly at 24.2 GHz, according to rectangular waveguide theory cut-off frequencies, modes up to  $m$  and  $n$  equal to 1246 and 1877, respectively, travel down the tunnel.

For that reason, the breakpoint, where most of them are sufficiently extinguished, is located at a few hundred meters in lower frequencies (from 1 to 6 GHz) [14]. However, at 24.2 GHz, it is at 8 km which means that theoretically the route is fully situated in the waveguide region.

The polarization seems to be independent of the loss exponent since it does not show a substantial difference in any of the cases. As Table 2 shows, this also holds true for the shadowing whose standard deviation is closely equal in both polarization directions.

The effect of the slope reveals an interesting difference in both polarization directions. There is a slope of 5.7%. Thus, focusing on the average of the last 50 m where this slope has its major effect, there are greater losses in vertical polarization. This result is noticed in the simulations and in the measurements. It may be due to, firstly, the general misalignment of both antennas, which is analyzed in Section 4.2, and, secondly, the fact that this effect is more notable in vertical polarization since these antennas present higher directivity in elevation than in azimuth.

Regarding the reference attenuation,  $A(d_0)$ , there is a slight difference between polarization directions. In the case of horizontal polarization, there are 2 dB more than in vertical. This is related to the tunnel dimensions that are directly connected to the effect of polarization in the antennas. When tunnel presents larger width than its height, higher reflection coefficients appear in vertical polarization. Lower attenuation

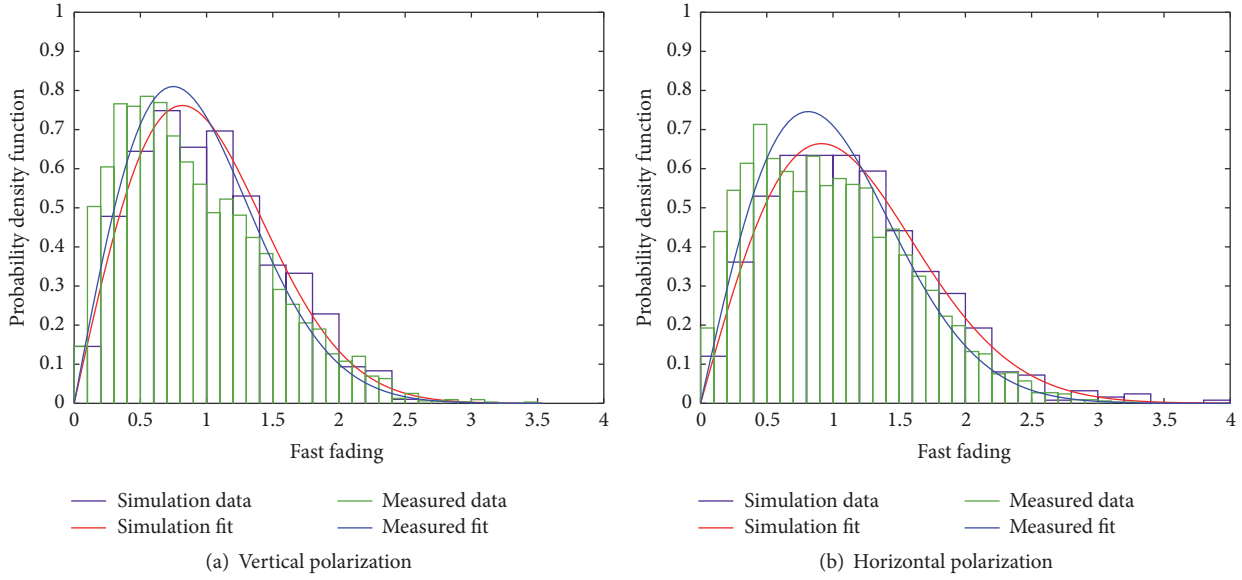


FIGURE 8: Comparison between measurements and simulation of the fast-fading probability density function.

comes out for the case of horizontal polarization. This effect is more significant in short distances. As [22] explains, in tunnels where there is a perfectly square cross-section, the result of vertical and horizontal polarization will be exactly the same.

**4.1.2. Fast Fading.** In this section, an analysis of the fast fading is shown. The results for vertical and horizontal polarization are described in Figure 8. A comparison between the measurements and simulations are made.

Rician distribution,  $P_r(r)$ , is a statistical model which better describes the fast-fading effect in an environment where there are LoS conditions.

$$P_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+A^2)/2\sigma^2} I_0 \frac{rA}{\sigma^2}, \quad (8)$$

where  $r$  is a random variable;  $\sigma$  is the standard deviation; and  $K$  factor, represented in (9), is the relation between LoS component,  $A$ , and multipath component.

$$K = 10 \log \left( \frac{A^2}{2\sigma^2} \right). \quad (9)$$

At this frequency, as Table 3 enumerates, the channel varies considerably fast independently of the experiment since the wavelength is small, 12.4 mm.

As Figure 6 shows, there are peaks up to 25 dB of attenuation in both cases. Horizontal polarization shows greater immunity to the shadowing, despite an insignificant impact on the fast fading compared to the vertical polarization.

Nevertheless, overall, fast fading has a major effect on the signal, as Figure 8 shows. This occurs when the coherence time of the channel is small relatively to the delay requirement of the application. In this case, the amplitude and phase change imposed by the channel vary considerably over the period of use.

TABLE 3: Fast-fading modeled with a Rician distribution at the vertical and horizontal polarization directions.

	Vertical	Horizontal
$K$ factor measurements	2.62 dB	2.62 dB
$K$ factor simulation	2.79 dB	2.62 dB
Std measurements	0.55	0.59
Std simulation	0.52	0.61

Regarding the  $K$  factor, the three scenarios present similar results. The relation between LoS and the multipath component is very low. This is because, as it was described in previous sections, the waveguide effect allows the propagation of a high number of modes at this frequency. As a result, the received signal is essential for not only the LoS component, but also the sum of all the reflected signals along the tunnel.

**4.2. Wideband Analysis.** This RT based simulator is used to acquire PDPs and AoAs whose information is helpful to understand the wideband channel. In this particular case, the data obtained from the measurements in narrowband are used to parametrize the needed values in the simulator in the wideband analysis.

**4.2.1. Power-Delay Profile.** The PDPs, in Figure 9(a), reveal that the energy is almost equally divided between LoS and the reflections since the power of these rays has slightly lower power than the one coming from the direct path. This is fully coherent with  $K$  factor resulting from the Rician distribution obtained in Section 4.1.2.

Besides, there is a clear decrease in the delay spread when the distance between Tx and Rx raises. This is connected with the great attenuation of the higher modes along the tunnel.

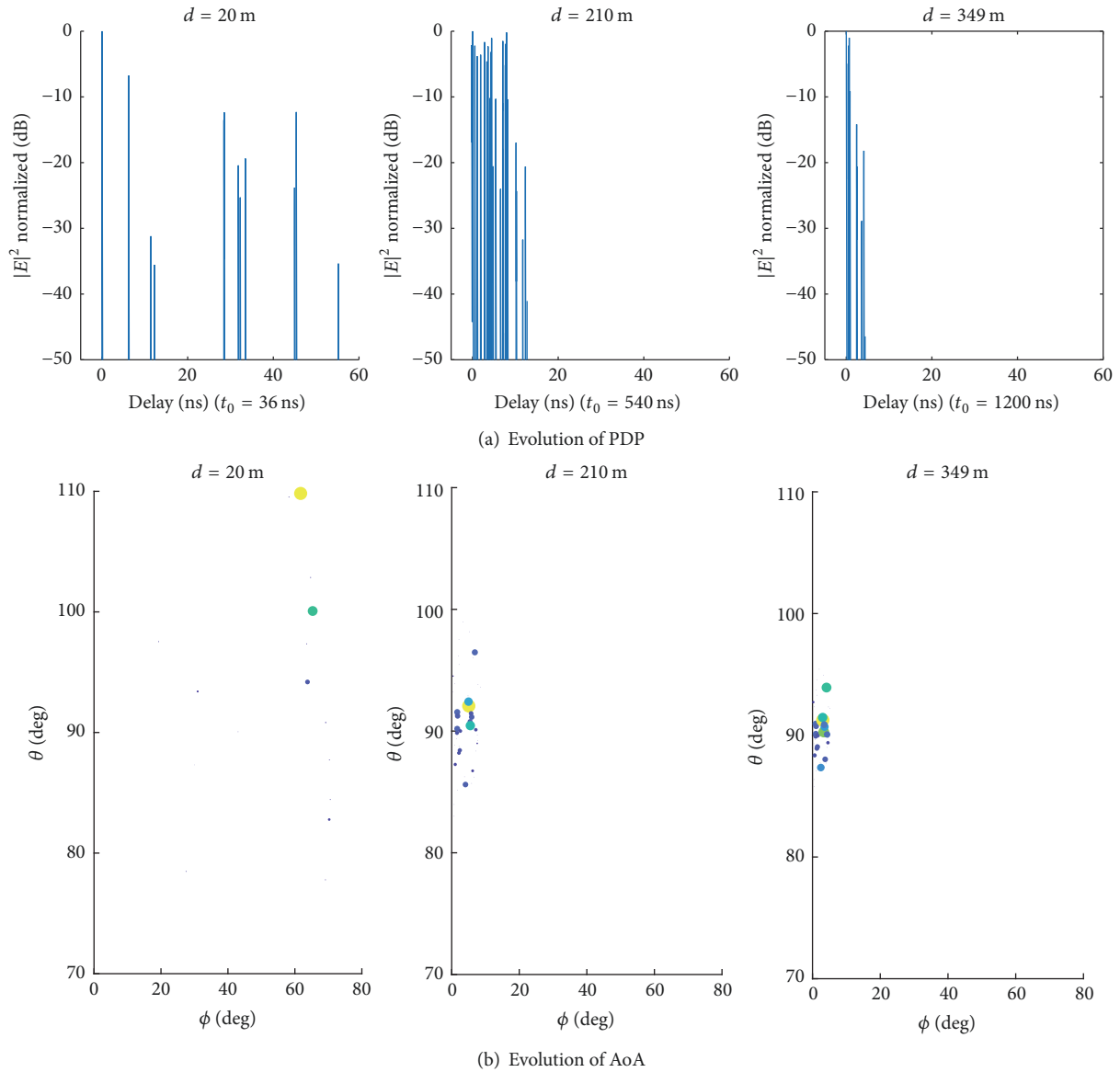


FIGURE 9: Simulation results for (a) PDP and (b) AoA along the distance.

In short distances, as there is an extensive spread of the pulse, signals may be damaged by intersymbol interference.

**4.2.2. Angle of Arrival.** The AoA, in Figure 9(b), shows also the decrease in the delay spread as Rx moves away from Tx. There is no ray coming from the negative axis of  $\phi$  since the horn antenna is directive and the front-to-back ratio is very high, as Figure 5 shows. Besides, all the rays come from the right side of the Rx, which is reasonable as there is misalignment of the antennas imposed by the set-up itself.

On the other side, when the antennas are close, most of the signals arrive from the back side of the antenna, but, when the antennas are sufficiently separated, the different rays are reduced until all the energy is fully concentrated in a single ray.

Considering the shape of the PDP obtained from simulations and the AoA of the rays, it can be assumed that the Doppler spectrum follows an asymmetric Jakes type [23]. It will change from moderate to strong asymmetry when the distance to the transmitter increases, according to [24]. The maximum Doppler deviation for this frequency, considering a 120 km/h speed of trains, would be  $\pm 9.68$  kHz.

## 5. Conclusion

In this paper, a narrowband and a wideband study have been performed for mmW band propagation in subway tunnels on metropolitan railways.

The narrowband analysis takes into account several approaches: measurements, simulations, and a modal propagation model. By combining these techniques, an accurate

path loss model is obtained. It is clear that there is a considerable lower loss exponent in comparison to the Friis formula since the measurements show a loss exponent of 1.3 in the tunnel. Regarding the simulations, although some limitations have been found when the maximum reflections of each ray are not enough, this inaccuracy is gradually reduced in accordance with the distance as the modes are becoming weaker and, as a result, fewer rays are necessary to represent more precisely the path loss.

The wideband analysis, based on the PDP and the AoA, reveals that the delay spread decreases as Rx moves away from Tx. This is an important result which, once again, highlights that higher modes extinguish faster than the lower ones. For that reason, the behavior of wideband channel improves with the distance to the transmitter.

Finally, an important remark is that there is the absence of published measurement on propagation at mmW frequencies in real subway tunnels, and this paper validates the possibility of using mmW frequency bands for communications in metropolitan railway tunnels.

## Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

## Acknowledgments

This work was developed under the framework of ENABLING 5G TEC2014-55735-C3-2-R funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and also funded by the Chinese Strategic International Cooperative Project of National key R&D Plan, 2016YFE0200200.

## References

- [1] S. Chen, J. Hu, Y. Shi et al., "Vehicle-to-everything (v2x) services supported by LTE-based systems and 5G," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 70–76, 2017.
- [2] J. Moreno, J. Riera, L. De Haro, and C. Rodriguez, "A survey on future railway radio communications services: challenges and opportunities," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 10, pp. 62–68, 2015.
- [3] A. Gonzalez-Plaza, J. Moreno, I. Val et al., "5G communications in high speed and metropolitan railways," in *Proceedings of the 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017*, pp. 658–660, France, March 2017.
- [4] L. Zhang, A. Gonzalez-Plaza, J. R. Fernandez et al., "Propagation measurements and modelling inside trains at 900 MHz, 2.4 and 5.8GHz," in *Proceedings of the 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017*, pp. 2895–2898, France, March 2017.
- [5] A. Arriola, P. M. Rodriguez, I. Val et al., "Characterization of an Outdoor-to-Indoor wireless link in metro environments at 2.6 GHz," in *Proceedings of the 15th International Conference on ITS Telecommunications, ITST 2017*, Poland, May 2017.
- [6] T. Rosowski, "5G spectrum scenarios, requirements and technical aspects for bands above 6 GHz, 2016," [https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/deliverables/METIS-II\\_D3.1.V1.0.pdf](https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/deliverables/METIS-II_D3.1.V1.0.pdf).
- [7] J. Barrett, "Global mobile Suppliers Association, 2017," <https://gsacom.com/5g-spectrum-bands/>.
- [8] X. Yang and Y. Lu, "Propagation characteristics of millimeter wave in circular tunnels," in *Proceedings of the 2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory*, pp. 1–5, Guilin, China, October 2006.
- [9] S.-W. Choi, H.-S. Chung, D.-S. Cho et al., "Performance evaluation of millimeter-wave-based communication system in tunnels," in *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2015*, USA, December 2015.
- [10] W. Hui, Z. Guoxin, and J. Minghua, "The measurements and simulations of millimeter wave propagation at 38ghz in circular subway tunnels," in *Proceedings of the 2008 China-Japan Joint Microwave Conference, CJMW 2008*, pp. 51–54, China, September 2008.
- [11] N. Prediger and A. Plattner, "Propagation measurements at 60 GHz in railroad tunnels," in *Proceedings of the IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - MTT '94*, pp. 1085–1087, San Diego, CA, USA.
- [12] J. Antes, F. Boes, T. Messinger et al., "Multi-gigabit millimeter-wave wireless communication in realistic transmission environments," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, no. 6, pp. 1078–1087, 2015.
- [13] C. Zhou, "Ray tracing and modal methods for modeling radio propagation in tunnels with rough walls," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 5, pp. 2624–2634, 2017.
- [14] C. Briso-Rodriguez, J. M. Cruz, and J. I. Alonso, "Measurements and modeling of distributed antenna systems in railway tunnels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 5, pp. 2870–2879, 2007.
- [15] C.-S. Zhang and L.-F. Guo, "Research on propagation characteristics of electromagnetic wave in tunnels with arbitrary cross sections," in *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication, ICFCC 2010*, pp. V122–V125, China, May 2010.
- [16] C. Zhou and R. Jacksha, "Modeling and measurement of radio propagation in tunnel environments," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 141–144, 2017.
- [17] M. Jia and J. Zhao, "A novel method to predict the wideband characteristics of MMW propagation in tunnels," in *Proceedings of the 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2011*, China, September 2011.
- [18] I. Val, A. Arriola, P. M. Rodriguez et al., "Wireless channel measurements and modeling for TCMS communications in metro environments," in *Proceedings of the 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017*, pp. 108–112, France, March 2017.
- [19] Vector Telecom, "A global supplier of microwave components, assemblies and antenna systems, 2017," <http://www.vectortele.com/>.
- [20] K. Guan, B. Ai, Z. Zhong et al., "Measurements and analysis of large-scale fading characteristics in curved subway tunnels at 920 MHz, 2400 MHz, and 5705 MHz," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 2393–2405, 2015.
- [21] A. Hrovat, G. Kandus, and T. Javornik, "A survey of radio propagation modeling for tunnels," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 658–669, 2014.
- [22] S. Bashir, "Effect of antenna position and polarization on UWB propagation channel in underground mines and tunnels," *IEEE*

*Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 9, pp. 4771–4779, 2014.

- [23] X. Zhao, J. Kivinen, P. Vainikainen, and K. Skog, “Characterization of doppler spectra for mobile communications at 5.3 GHz,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 14–23, 2003.
- [24] X. Chen, Y. Pan, Y. Wu, and G. Zheng, “Research on Doppler spread of multipath channel in subway tunnel,” in *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Communication Problem-Solving, ICCP 2014*, pp. 56–59, China, December 2014.

# Network emulator for V2X communication systems

Ana González-Plaza<sup>1,2</sup>, César Briso-Rodríguez<sup>2</sup>, Rafael Gutiérrez-Cantarero<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, ETSIS Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid

<sup>2</sup>Área de Telecomunicaciones, Ingeniería y Economía del Transporte S.M.E. M.P., INECO,  
Madrid, Spain, agonzalez.plaza@ineco.com

**Abstract**—Wireless communication systems are one of the greatest revolutions of our time. In this context, there are still many challenges to be addressed in the field of intelligent transport systems. These are related to the solution of the great difficulties that these complex environments of propagation present such the mobility aspect. In this sense, the objective of this paper is to present a network emulator for V2X communication systems. The advantages of this device is that in a simple, controlled and reproducible way, user can find the zones of possible lack of wireless coverage and unsuccessful handover process. As a result, the problematic in high-speed environments can be more easily assessed. The developed system allows emulating the communication links between three vehicles and one base station, controlling the amplitude in a range of 95dB, the phase in 360° and the Doppler shift from 0 to 1 kHz. For this purpose, a propagation model and a time series generator that is synchronized with the speed of the mobile are used.

**Index Terms**—channel modelling, Intelligent Transportation Systems, network emulator, V2V, V2I, V2X, wireless communications technologies

## I. INTRODUCTION

Intelligent transportation systems (ITS) have a great potential for the future transportation systems. However, nowadays there are still some challenging aspects to be addressed. One of these is related the unfavorable environment characteristics for wireless communications due to the rapid change of the network and the amount of multiple reflecting objects that, as a result, degrades the quality of the received signal, together with the extra difficulty of traveling through tunnels, cuts, uninhabited areas, etcetera [1].

In this way, following the guidelines of European projects [2][3] and important companies in the sector, new approaches in the architecture of communications not only greatly improve current communications, but also open the door to new business models, services and applications.

In most of the current transportation systems, the network cannot provide an efficient service since the systems receive the radio signal directly from a distant base station [4]. In fact, in recent years, vehicle to ground communications have been the focus in the transportation communication systems. However, new services and applications require implementing a new set of communication links to maximize the capabilities of each technology [3]. These are the communication from vehicle to ground base station (V2I), vehicle to vehicle (V2V) or, in general vehicle to everything (V2X).

Besides, as the availability aspect is critical for secure communications [4], it is compulsory to plan the deployment of the new communication infrastructures. However, the tests are extremely costly in terms of time and price. This means that to implement tests in realistic scenarios requires a great inversion from operators and infrastructure companies, especially when the new communication links get involved in the tests design [5]. As a result, currently, they do not feel economically attracted to put such an effort. Therefore, the objective of this work is to develop a network emulator system that allows handover evaluation ad hoc for ITS. The advantages of this type of devices are that in a simple, controlled and reproducible way, the zones of possible lack of wireless coverage and the handover process so problematic in high speed environments can be easily assessed.

These emulators are widely used to pre-plan the implementation of new mobile communication networks [5], as it allows easy to find areas with possible lack of coverage and unsuccessful handover processes, and shows, in a safe way, where errors can be found in the plan. The novelty of the emulator proposed in this work is that it is particularly designed for ITS. Hence, it is made for of evaluating the behavior of the propagation channel along a route made by intelligent transportation systems, such as trains or vehicles. This means that it is able to reproduce the fading channel for every communication link involved in ITS.

To achieve this goal, an emulator device is being implemented using the most relevant channel models of the literature [6-9].

This paper is organized as follows: Section II presents two candidate wireless technologies for ITS; Section III shows the handover tester emulator developed for V2V communication systems; finally, in Section IV, there the conclusion of this work.

## II. WIRELESS TECHNOLOGIES FOR INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

V2X links require the use of a specific technology, as they operate in conditions very different from the traditional communications systems. On the hand, a very short latency is required to ensure reliable information, when there a strong influence of the environment. On the other hand, it is necessary to analyze, the interferences with each other users.

To address this challenge, several different technologies have been developed and, in the following, two of the most

relevant wireless technologies for ITS are presented: first, IEEE 802.11p and, then, LTE-V technologies.

#### A. IEEE 802.11p

The most popular set of standards for V2X, developed by IEEE working group, is WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments). Its objective is to provide communication V2V and V2I, where the exchange of information must be completed in a very short period of time. Some of the applications are the management of highways, accident prevention, route time management, emergency management, passenger information, etc.

Among these standards, the IEEE 802.11p standard describes the use of the physical layer and the medium access (MAC) layer band. The upper layers are defined by the IEEE 1609 standard [11].

IEEE 802.11 p physical layer is based on the 802.11a standard modifying some features such as the reduction of the bandwidth from 20 MHz to 10 MHz. Besides, it uses OFDM modulation (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) and the spectrum allocation is, in the 5.9 GHz frequency band, occupying 75 MHz of bandwidth and divided into seven channels.

This standard has been tested in several in extensive experiments. Two examples are, in Europe, the ETSI has organized four events to carry out extensive field trials [12] and in projects like Safety Pilot in the USA [13], among others. As a result, IEEE 802.11p is ready for deployment. These trials reflect the significant investments for the last 10 years to validate the 802.11p technology. This means that an alternative technology would require passing through this extensive assessment as IEEE 802.11p did.

#### B. LTE-V

As it was mentioned in the previous subsection, many efforts have been made developing V2V communications using IEEE 802.11p. However, this standard needs to face an important challenge to guarantee reliability given that it uses the carrier sense multiple access with collision avoidance as medium-access technique. Besides, it is expected that low latency and high reliability requirements of the road safety applications can be applied to both V2V and V2I communications [4].

For this reason, the Third Generation Partnership Project (3GPP) published the Release 14, [14] where Long Term Evolution for Vehicles (LTE-V) was presented for the first time. LTE-V is a wireless standard for V2X communications. It provides a significant improvement in the link budget of the physical layer in comparison to 802.11p. Besides, LTE-V increases the redundancy transmission per packet, which, as a result, improves the reliability.

In Release 14, two new communication modes, 3 and 4, were introduced. In mode 2, the BSs keep selecting and managing the radio resources used by vehicles for V2V communications. However, mode 4 allows vehicles selecting the radio resources by themselves for V2V communications. This means that mode 4 is able to operate without cellular

coverage. This is a great advantage in safety applications since V2V communication would not depend on the availability of cellular coverage [15].

In relation to the physical layer, LTE-V utilizes single-carrier frequency-division multiple access, and supports 10- and 20-MHz channels, using the spectrum allocation of LTE.

Although these systems, IEEE 802.11p and LTE-V are designed specifically for transportation environments, their successful performance is very dependent on the speed of the vehicle, environment, interferences, among other propagation characteristics. Therefore, it is necessary to test these aspects very carefully in laboratory. This is the aim of, developing of the network emulator proposed in this paper.

### III. NETWORK EMULATOR SYSTEM

Radio channel emulators are tools for testing wireless communication systems, as the ones described in the previous Section, at a system level. They reproduce a realistic radio channel produced in a specific environment since it provides an instant faded representation of a transmitted signal to the receiver according to the environment. As technology moves forward to take advantage of more complex channel characteristics such as MIMO or V2X communications, the emulation of the radio environment becomes more critical to perform a successful test set-up [5].

This tool reproduces a radio channel in shielded anechoic chambers as a realistic electromagnetic environment using specific channel models such WINNER II [6], ITU-R model [7], 3GPP Spatial model [8] and 3GPP Release 14 channel model [9].

The network emulator presented below has several advantages since it is able to replicate dedicated multi-path propagation under reproducible, stable and, risky conditions that would not be accessible otherwise. It easily allows finding areas with potential lack of coverage and it shows areas where the handover process is done unsuccessfully according to the requirements of the communications. TABLE I shows the characteristics of this network emulator system.

TABLE I: Network emulator system characteristics

	Range	Steps
Frequency	1 to 6000 MHz	
Attenuation	0 - 90 dB	0.25 dB
Phase	0 to 360 degrees	1 degree
RF hardware period time	600 us	
Max. emulated speed	for 1 GHz	480 km/h
	for 5 GHz	360 km/h

#### A. Situation description

The handover emulator is used to analyze the handover process when several vehicles are connected to each other besides to the ground network. The test scenario is described in Fig. 1. It shows a train, V1, travelling along a railway where there are one train ahead it, V2, and another behind it, V3.

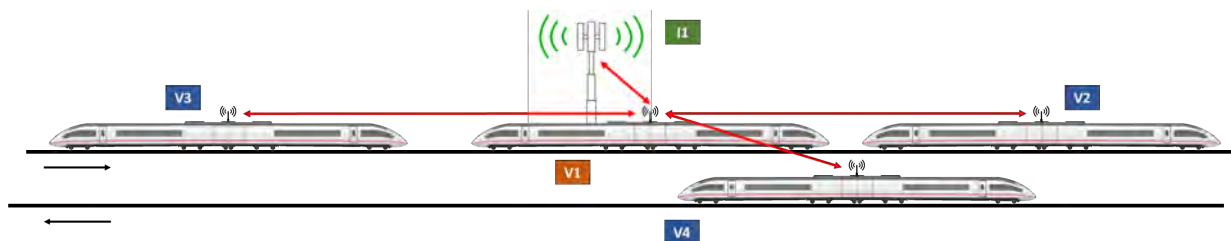


Fig. 1: Diagram of V2V and V2I communications in the railway environment

In addition, there is another train crossing them, V4. Finally, there is a base station, I1, to whom V1 is connected.

The communications links to evaluate are the ones from V1 to the rest. This is: V1-V2, V1-V3, V1-V4 and V1-I1. One advantage of this emulator is that not necessarily V2, V3, V4 and I1 are always the same vehicle and base station, but the ones closer to V1 since we can upload as much routes as we need to test in the software given that the objective is to obtain the handover performance of V1 along the entire route. This will be further explained in Section III-C.

It is important to note that, in this scenario presented, we consider a railway environment to simplify the explanation of the situation, but it is applicable to any other kind of terrestrial vehicles taking into account that this system is able to emulate up to three other vehicles plus one base station.

### B. Hardware description

As it was mentioned before, the objective is to emulate the propagation channel when a vehicle travels along a route crossing and communicating with other vehicles.

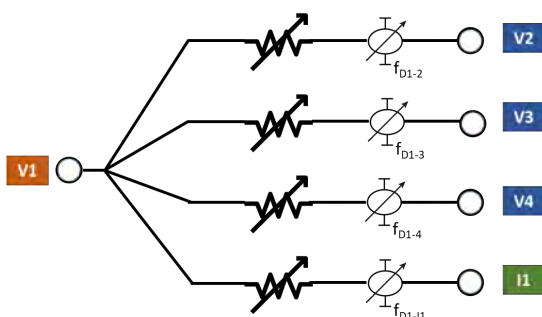


Fig. 2: Radio frequency hardware design

The device presented is specially designed for high-mobility scenarios, where there are fixed transmitters for V2I and V2V communication links. It is able to instantly attenuate, add fading and shift the signal to the transmitter radio signals according to the instantaneous conditions of the channel. This kind of scenarios is singular given the characteristics of the radio channel, which produces on the transmitted signals attenuation and fading.

This network emulator has two parts: the radio-frequency (RF) hardware and a controller system. The RF hardware, shown in Fig. 2, is composed of a matrix of sections according to the input transmitter (V1) and branches according to the

number of vehicles and base station to which V1 communicates, in this case, V2, V3, V4 and I1. Hence, the result is:

- Four electronically controlled variable attenuators
- Four phase + Doppler programmable shifters
- One 4-ports splitter/combiner

The controller system is composed by a PC controller that calculates the samples using a software developed in Matlab whose are sent to a single-board computer with a real-time operating system. The former is in charge of sending every period of time a new sample to the RF hardware.

With regard to the attenuators, each one of them is controlled electronically. The value is calculated according to the virtual distance between V1 and the rest of the elements (V2, V3, V4 and I1) and the fading produced by the channel. This last aspect depends on the type of simulation environment and the speeds of the transmitter and receiver. Its behavior is modelled with statistical functions that reproduce the propagation of the communication signal between the transmitter and the receiver. This is the reason why it is necessary to have as many branches as vehicles want to be emulated.

This device is innovative since it has the ability to add path loss attenuation and fading to the signal so important in communications in high-speed environments. Therefore, thanks to this novel feature, we would be able to characterize the propagation effects more accurately

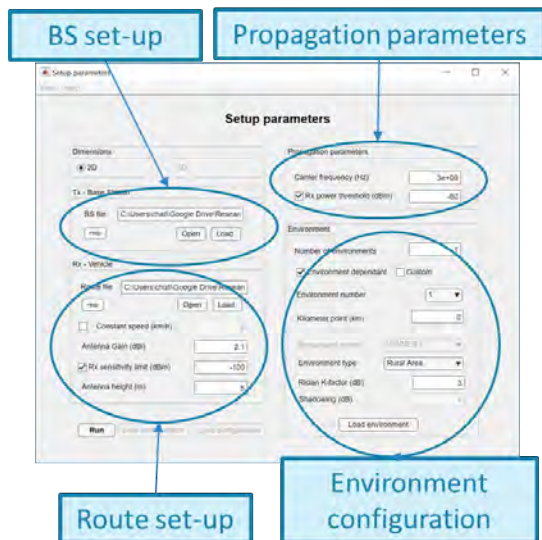
### C. Software description

The software of the network emulator allows the user to configure the emulation parameters: vehicles routes, BS, propagation features, environments along the same route, etc. Then, it shows the emulation progress in real time.

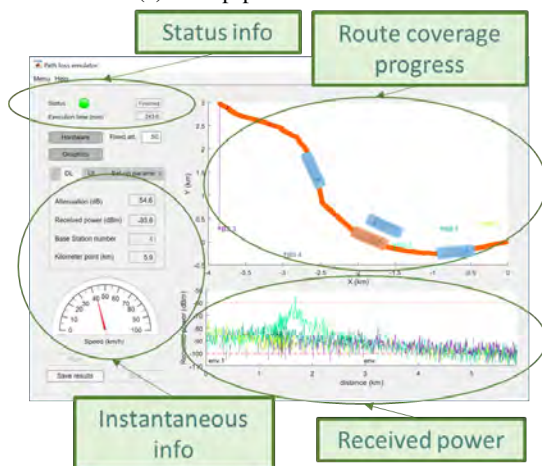
To implement this, two screens have been programmed that are shown in Fig. 3. In the first screen (Fig. 3 (a)), the vehicles' routes are loaded, that is, the coordinates of the route and the speed associated with each point. These routes can be obtained from any GPS log. One important point here is that there is not limitation regarding the number of routes that we can upload, making possible to emulate as many routes as we want, having as a result the possibility of using V2, V3 and V4 as different vehicles along the same emulation.

The positions of the BSs are also loaded with their basic parameters such as the height, the transmitted power, sensibility and antenna characteristics (gain, beam and orientation).

In addition, users can define a multi-environment scenario, that is, dense urban, suburban, rural environment, etcetera.



(a) Set-up parameters screen



(b) Emulation screen

Fig. 3: Software emulator screens

Moreover, users experienced in propagation can select the type of channel propagation model they want to test. In this case, WINNER II [6], ITU-R Model [7], 3GPP Spatial model [8], and 3GPP release 14 [9] model are included.

The second screen (Fig. 3 (b)) is about the emulation screen. It shows the instant information that is sent to the hardware and, through illustrative graphs, the progress of the emulation can be followed in terms of coverage and received power from several BS.

#### D. Validation

In this section, the validation presented in this paper is focused on the proper operation of the network emulator in terms of instantaneous received power and Rician distribution-fading precision, using the equipment presented in Fig. 4.

The analysis consists of emulating a route that follows a straight line with a single base station at the first point of the

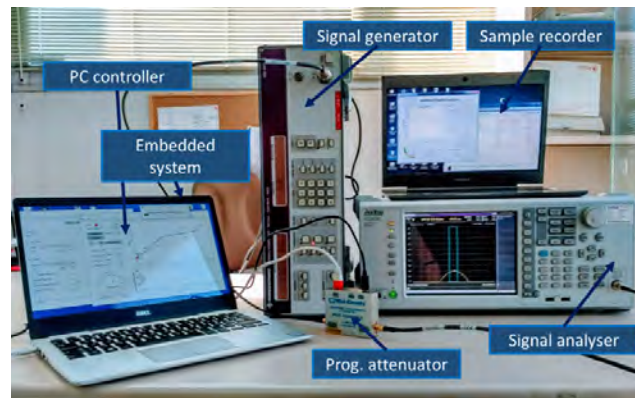


Fig. 4: Equipment for validating the propagation emulator system

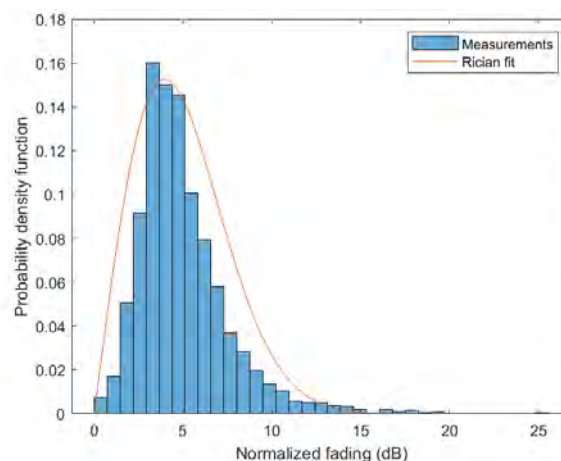


Fig. 5: Analysis of the accuracy of the k-factor, when k is 3 dB

route. This is fanciful but useful to understand in the simplest manner the behavior of the entire system.

There are two main objectives in this test: to show how similar is the programmed values and the signal received by the signal analyzer and more the programmed Rician fading to the measured one.

As we can deduce from Fig. 6, the test consists of implementing two experiments: one without large-scale fading (this is just the free lost space model), and another with a Rician fading with  $k = 3dB$  and no shadowing.

In both cases, (a) and (b) compared to (c) and (d) respectively, we can observe that the similarity between the emulator and the measures are closely the same. There are small inaccuracies as the programmable attenuator jumps from one attenuation to the following in steps of 0.25 dB. This especially becomes more visible at higher attenuation values, in which the noise floor affects more substantially.

In relation to the accuracy in applying a fading channel, Fig. 5 shows a fit with a Rician probability density function with  $k = 3$  dB given the same standard deviation. As we can observe, the theoretical curve fits with the measured curve. The small

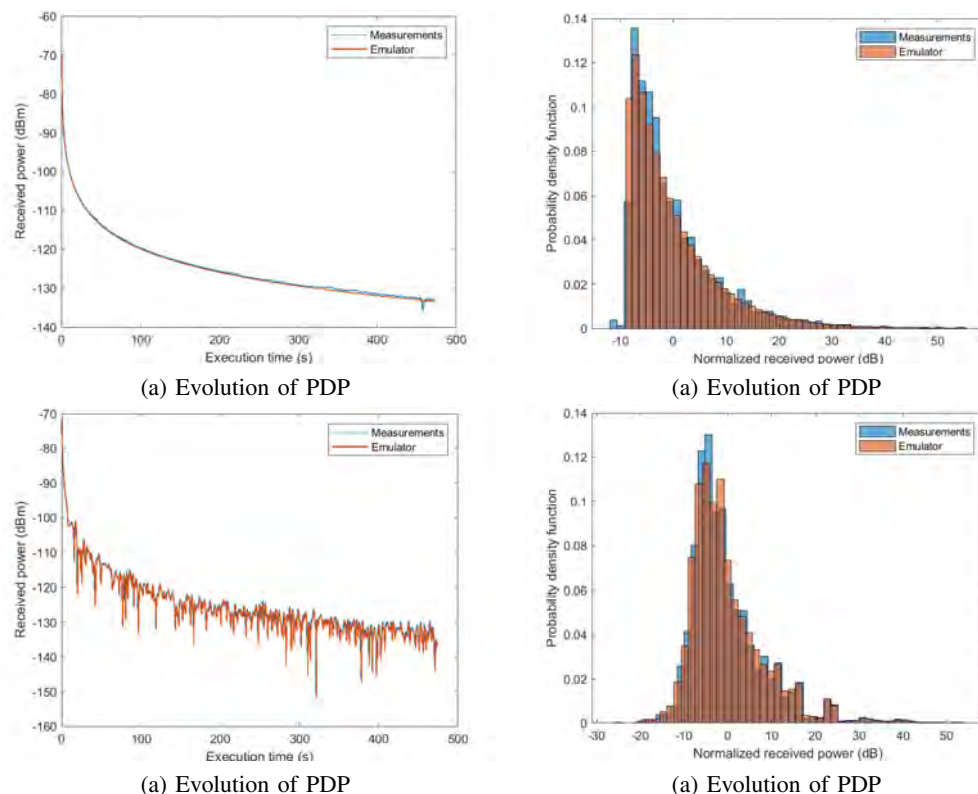


Fig. 6: Network emulator validation using free space path loss model.

inaccuracies are because the samples are not large enough for having the perfect fit.

#### IV. CONCLUSION

The network emulator has been successfully implemented as the core operation fulfills all the requirements and provides accurate instantaneous attenuation at any point regardless of the routes topology. It tests V2X communication links in a laboratory and its results can be compared to real test experiments. The developed tool has a wide range of control of amplitude, phase and Doppler shift. It can be considered as a real-time emulator as it provides a time resolution of 600  $\mu$ s, which allows emulating a wide range of speeds and frequencies. To conclude, this prototype opens the opportunity of creating a professional equipment that could be used in real scenarios for plan-plan and assess the well operation of a new or existing infrastructure for intelligent transportation systems.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work has been developed in the Radiocommunication Group (GRC) of the Universidad Politécnica de Madrid, a consolidated research group located in the Escuela Técnica de Sistemas de Comunicaciones (ETSIST), within the framework of ENABLING 5G TEC2014-55735-C3-2-R funded by the Ministry of Economy and Competitiveness of Spain, and also financed by the China International Strategic Cooperative Project of the National Plan Key of R+D, 2016YFE0200200

#### REFERENCES

- [1] A. Gonzalez-Plaza et al., "Propagation at mmW band in metropolitan railway tunnels," *Wireless Communications and Mobile Computing*, no. Communications and Networking for Connected Vehicles (CNCV), p. 10, 2018
- [2] Shift2Rail. Shift2Rail Master plan. Tech. rep. Shift2Rail, 2015.
- [3] ETSI. ETSI EN 302 665. Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. Tech. rep. ETSI, 2010
- [4] A. Gonzalez-Plaza et al. '5G communications in high speed and metropolitan railways'. In: 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation
- [5] P. J. Green. 'Implementation of a real-time Rayleigh, Rician and AWGN multipath channel emulator'. In: TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2017
- [6] P. Kyösti; et al. WINNER II Channel Models. Tech. rep. WINNER, 2007.
- [7] P Series. 'Propagation data and prediction methods required for the design of Earthspace telecommunication systems'. In: Recommendation ITU-R (2015), pp. 618–12.
- [8] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations. Tech. rep. 3GPP, 2009.
- [9] ETSI. 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. Tech. rep. 3GPP, 2017..
- [10] D. Jiang and L. Delgrossi. 'IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments'. In: VTC Spring 2008 – IEEE Vehicular Technology Conference. IEEE, 2008. doi: 10.1109/vetecs.2008.458.
- [11] ETSI. ITS Cooperative Mobility Services Event 4.
- [12] ITS. Safety pilot
- [13] S. Chen, J. Hu, Y. Shi and L. Zhao, "LTE-V: A TD-LTE-Based V2X Solution for Future Vehicular Network," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 997-1005, Dec. 2016.
- [14] R. Molina-Masegosa and J. Gozalvez, "LTE-V for Sidelink 5G V2X

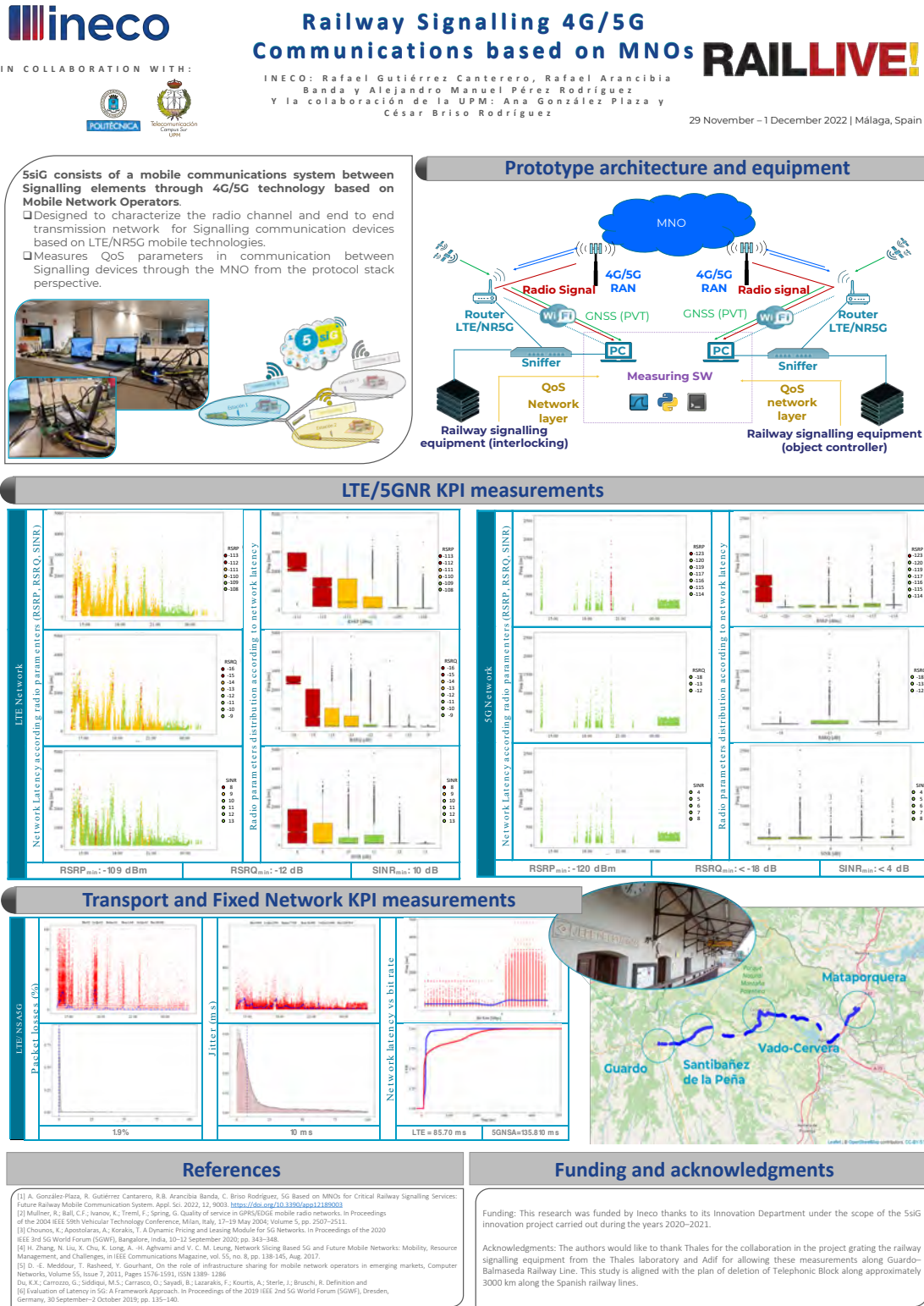


Figura 1: Póster Rail Live