

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN**

ANÁLISIS Y PROPUESTA DE DISEÑO DEL DESPLIEGUE DE TECNOLOGÍAS 5G EN ENTORNOS FERROVIARIOS DE ALTA MOVILIDAD

LAURA GALLEGO MENÉNDEZ

2018

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Análisis y propuesta de diseño del despliegue de tecnologías 5G en entornos ferroviarios de alta movilidad

Autor: D. Laura Gallego Menéndez

Tutor: D. José Ignacio Alonso Montes

Departamento: Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones

TRIBUNAL:

Presidente: D. el nombre del presidente

Vocal: D. el nombre del vocal

Secretario: D. el nombre del secretario

Suplente: D. el nombre del suplente

Fecha de lectura:

Calificación:

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



TRABAJO FIN DE GRADO

**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN**

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE DISEÑO
DEL DESPLIEGUE DE TECNOLOGÍAS
5G EN ENTORNOS FERROVIARIOS DE
ALTA MOVILIDAD**

LAURA GALLEGO MENÉNDEZ

2018

Resumen

Los sistemas de comunicaciones están en continua evolución, adaptándose a las nuevas necesidades que surgen según avanzan las tecnologías en el campo de las telecomunicaciones. Sin embargo, en los entornos ferroviarios de alta movilidad no se han acomodado a este progreso como sí está ocurriendo en otras industrias verticales. En este escenario se siguen utilizando las tecnologías GSM-R y TETRA que se encuentran desfasadas en comparación con los sistemas LTE utilizados por la sociedad, por lo que, para mejorar los servicios y prestaciones de sus comunicaciones se propone una evolución de las mismas a sistemas 5G, tras su implantación pública en el año 2020. En el ámbito del ferrocarril existen distintos tipos de servicios: relacionados con la seguridad, operacionales no relacionados con la seguridad y servicios proporcionados a los pasajeros. Con los sistemas de comunicaciones de tecnología 5G se mejorarán las características actuales y aparecerán nuevas prestaciones para cada uno de los servicios, mejorando la gestión y el funcionamiento de los trenes y la experiencia de los usuarios y de los trabajadores de los entornos ferroviarios de alta movilidad. Cada uno de los sistemas de comunicaciones para los distintos servicios tendrá sus propias características para adecuarse a sus necesidades y hacer más eficiente su funcionamiento. En este TFG se propone la implantación de esta nueva generación de comunicaciones manera progresiva para evitar problemas durante su despliegue y asegurar el correcto funcionamiento y la seguridad en el escenario del ferrocarril, siendo una fecha tentativa de la desaparición del uso de las tecnologías actuales el año 2030, evitando que los sistemas de comunicaciones se queden obsoletos.

Palabras clave

5G, alta velocidad, comunicaciones, despliegue, ferrocarril, GSM-R, IoT, LTE, macroceldas, microceldas, migración, operativa, pasajeros, redes, seguridad, sensores, servicios, sistemas, tecnologías, TETRA, tren.

Summary

Communications systems are constantly evolving, adapting to the new needs that are arising with technologies advances in the telecommunications field. However, in high speed railways environments these systems have not been accommodated to this progress as it is happening in other vertical industries. This scenario is still using GSM-R and TETRA technologies that are out-of-date in comparison with LTE systems used by society, so, to improve the services and the features of its communications, it is proposed an evolution of them to 5G systems, after its public introduction in the year 2020. There are three different types of services in the railway scope: security-related, operational not related to security and the services provided to passengers. With 5G technology communications systems, the current characteristics will be improved and will appear new features for each service, improving the management and the operation functions of trains and the experience of users and workers of high speed railways environments. Each one of the communications systems for the different services will have its own characteristics to adapt to their own needs and make its functioning more efficient. This thesis proposes the introduction of this new generation of communications in a progressively way to avoid problems during its deployment and ensure the proper operation and safety on the railway scenario, being a tentative date of current technologies use disappearance the year 2030, preventing the communications systems obsolescence.

Keywords

5G, high speed, communications, deployment, railway, GSM-R, IoT, LTE, macrocell, microcell, migration, operational, passengers, networks, security, sensors, services, systems, technologies, TETRA, train.

Índice

1. Introducción y objetivos	17
2. Visión general de 5G: Nuevo escenario para las comunicaciones	19
2.1. Estudio y análisis de las prestaciones teóricas y de las distintas tecnologías y técnicas de 5G.....	19
2.2. Potenciales aplicaciones.....	21
2.3. Nuevos escenarios para las comunicaciones	23
2.3.1 Escenarios de uso	23
2.3.2 Escenarios de despliegue	25
3. Bandas de frecuencias potenciales para el despliegue de 5G	29
3.1. Principales bandas de frecuencias de 5G en España	30
4. Análisis de los sistemas de comunicaciones en el ferrocarril	33
4.1. GSM-R.....	33
4.2. TETRA	37
4.3. Long Term Evolution (LTE).....	38
4.4. 5G	43
4.5. Resumen.....	51
5. Clasificación y descripción de los sistemas de comunicaciones en función de su operativa en el sector ferroviario	53
5.1. Servicios en entornos ferroviarios	53
5.1.1 Servicios relacionados con la seguridad.....	53
5.1.2 Servicios operacionales no relacionados con la seguridad	54
5.1.3 Servicios proporcionados a los usuarios	55
5.2. Sistemas de comunicaciones según su operativa	56
6. Propuesta de diseño del despliegue de servicios y tecnologías 5G en el entorno ferroviario	57
6.1. Requisitos específicos de la tecnología 5G para satisfacer las exigencias técnicas de la operativa ferroviaria	57
6.2. Propuesta de migración e impacto de las tecnologías en la infraestructura.....	57
6.3. Roadmap tentativo para el despliegue de servicios 5G en entornos ferroviarios.....	62
7. Conclusiones	63
8. Bibliografía	65
9. ANEXO I: Temas éticos, sociales, económicos y ambientales.....	69
9.1. Introducción	69
9.2. Descripción de impactos relevantes relacionados con el proyecto.....	69
9.3. Análisis detallado de alguno de los principales impactos	70
9.4. Conclusiones.....	71
10. ANEXO II: Presupuesto económico.....	73

Índice de figuras

Figura 1. Evolución temporal del 5G [5].....	19
Figura 2. Tecnologías 5G [8]	21
Figura 3. Industria 4.0 [11]	23
Figura 4. Escenarios de 5G [6].....	23
Figura 5. Escenarios de uso [14].....	25
Figura 6. Bandas de frecuencias y empresas que están haciendo pruebas experimentales de 5G [16]	29
Figura 7. Espectro de frecuencias del enlace a) ascendente y b) descendente de GSM y GSM-R [33]	33
Figura 8. Arquitectura de la red GSM-R [33].....	36
Figura 9. Arquitectura de la red LTE en entornos ferroviarios [33]	41
Figura 10. Arquitectura VoLTE en entornos ferroviarios [33]	42
Figura 11. Arquitectura de red de 5G [2]	44
Figura 12. Celda fantasma y MIMO masivo en 5G [43].....	44
Figura 13. Arquitectura de NG-RAN para la coexistencia de LTE y 5G [45]	44
Figura 14. Despliegue de la red sin nodos repetidores a 4GHz [15]	45
Figura 15. Despliegue de la red con nodos repetidores a 30 GHz [15]	45
Figura 16. a)Reutilización de una frecuencia para 3 celdas b)Reutilización de dos frecuencias para 3 celdas [47]	46
Figura 17. NTN con NG-RAN y repetidor satélite entre el gNB y los UEs terrestres para ofrecer servicios a los usuarios [50].....	49
Figura 18. NTN con NG-RAN con gNB en el satélite para ofrecer servicios a los UEs [50]	49
Figura 19. NTN con NG-RAN y un nodo repetidor para ofrecer los servicios a los UEs con un repetidor satélite entre el gNB y el nodo repetidor [50]	49
Figura 20. NTN con NG-RAN con gNB en el satélite y un nodo repetidor para ofrecer servicios a los UEs [50].....	49
Figura 21. Servicios en entornos ferroviarios [55]	53
Figura 22. Clasificación de los servicios ferroviarios	55
Figura 23. Propuesta de la arquitectura de la red con dos niveles (macro/micro) [33]	58
Figura 24. Infraestructura radio de la próxima generación de trenes [35].....	60
Figura 25. Posible marco temporal de la migración de GSM-R a 5G [35]	62

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación entre 4G y 5G [6]	20
Tabla 2. Características de puntos de acceso en interiores [15].....	25
Tabla 3. Características de entornos urbanos densos [15]	26
Tabla 4. Características de entornos rurales [15]	26
Tabla 5. Características de macroentornos urbanos [15]	26
Tabla 6. Características de entornos de alta velocidad [15]	26
Tabla 7. Características de áreas con poca población y coberturas amplias [15].....	27
Tabla 8. Características de entornos urbanos con cobertura para conexiones masivas [15].....	27
Tabla 9. Características de autopistas [15]	27
Tabla 10. Características de la red urbana de coches conectados [15]	27
Tabla 11. Características del escenario comercial aire-tierra [15].....	28
Tabla 12. Características del escenario de aeronaves pequeñas [15]	28
Tabla 13. Características de la extensión satélite-tierra [15].....	28
Tabla 14. Anchos de banda de algunos casos de uso [20]	30
Tabla 15. Principales bandas de frecuencias para el despliegue de 5G en España [21] [22] [23] [24]	31
Tabla 16. Comparación de las características de GSM y GSM-R.....	34
Tabla 17. Tiempos de establecimiento de llamadas en GSM-R [31].....	34
Tabla 18. Requisitos de calidad de GSM-R [31].....	35
Tabla 19. Servicios que deben soportar los distintos tipos de radio en GSM-R [31]	35
Tabla 20. Valores de calidad de servicio obtenidos de TETRA [36] [28]	37
Tabla 21. Características de los sistemas TETRA	38
Tabla 22. Comparación de las características de LTE y LTE en entornos ferroviarios.....	39
Tabla 23. Características de calidad de los servicios LTE [40]	42
Tabla 24. Comparativa de las distintas tecnologías para WSN en entornos ferroviarios [31]....	48
Tabla 25. Características de calidad de los servicios 5G [48]	48
Tabla 26. Espectro de los sistemas satélite [50]	49
Tabla 27. Latencia en comunicaciones satélite 5G [15] [51].....	50
Tabla 28. Características principales de los sistemas de comunicaciones de los entornos ferroviarios estudiados	51
Tabla 29. Sistemas de comunicaciones en entornos ferroviarios según su operativa [31] [32] [35] [10].....	56
Tabla 30. Características de las comunicaciones tren-infraestructura para los servicios relacionados con la seguridad de la red propuesta [58]	59
Tabla 31. Características de las comunicaciones del interior del tren para los servicios operacionales de la red propuesta [58]	59
Tabla 32. Características de las comunicaciones del tren para los servicios para los pasajeros de la red propuesta [58].....	60
Tabla 33. Cálculo de los honorarios	73
Tabla 34. Cálculo de los gastos en material	73
Tabla 35. Cálculo del presupuesto económico.....	73

Acrónimos

3GPP	<i>The 3rd Generation Partnership Project</i>
5G PPP	<i>5G infrastructure Public-Private Partnership</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management</i>
BBU	<i>BaseBand Unit</i>
BPSK	<i>Binary PSK</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BSS	<i>Base Station Subsystem</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CBTC	<i>Communications-Based Train Control</i>
CCTV	<i>Closed Circuit TeleVision</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
CP-OFDM	<i>Cyclic Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
C-RAN	<i>Centralized-RAN</i>
CSCF	<i>Call Session Control Functions</i>
CSFB	<i>Circuit Switched FallBack</i>
D2D	<i>Device-to-Device</i>
DL	<i>DownLink</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
E-CSCF	<i>Emergency-CSCF</i>
eHealth	<i>Electronic Health</i>
EIRENE	<i>European Integrated Railway Radio Enhanced Network</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile BroadBand</i>
eMLPP	<i>Enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ERTMS	<i>European Rail Traffic Management System</i>
ETCS	<i>European Train Control System</i>

e-ticketing	<i>Electronic Ticketing</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
E-UTRAN	<i>Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FA	<i>Functional Addressing</i>
FBMC	<i>Filter Bank MultiCarrier</i>
FDD	<i>Frequency-Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FRMCS	<i>Future Railway Mobile Communication System</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GFDM	<i>Generalized Frequency Division Multiplexing</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
GSM-R	<i>GSM-Railway</i>
HAPS	<i>High Altitude Pseudo-Satellites</i>
HEO	<i>High Earth Orbit</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
ICI	<i>Inter-Carrier Interference</i>
I-CSCF	<i>Interrogating-CSCF</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystems</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
ITU-R	<i>ITU – Radiocommunications</i>

LDA	<i>Location Dependent Addressing</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution – Advanced</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MCPTT	<i>Mission Critical Push-to-Talk</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
mHealth	<i>Mobile Health</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
mMTC	<i>Massive Machine-Type Communications</i>
MORANE	<i>Mobile Radio for Railways Networks in Europe</i>
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
MS	<i>Mobile Station</i>
MSC	<i>Mobile Switching Center</i>
NFV	<i>Network Functions Virtualization</i>
NG-RAN	<i>Next Generation-RAN</i>
NOMA	<i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>
NSS	<i>Network and Switching Subsystem</i>
NTN	<i>Non-Terrestrial Network</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature PSK</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RBC	<i>Radio Block Centre</i>

REC	<i>Railway Emergency Call</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RRE	<i>Remote Radio Equipment</i>
RRH	<i>Remote Radio Head</i>
RSAP	<i>Railway Safety Answering Point</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier – Frequency Division Multiple Access</i>
SCMA	<i>Sparse Coded Multiple Access</i>
S-CSCF	<i>Serving-CSCF</i>
SDN	<i>Software Defined Networking</i>
S-GW	<i>Serving GateWay</i>
TCMS	<i>Train Control and Management System</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
TRxPs	<i>Transmission Reception Points</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UFMC	<i>Universal Filtered MultiCarrier</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIC	<i>Union Internationale des Chemis de Fer</i>
UL	<i>UpLink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>
uRLLC	<i>Ultra-Reliable and Low Latency Communications</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
V2X	<i>Vehicle-to-everything</i>
VBS	<i>Voice Broadcast Service</i>
VGCS	<i>Voice Group Call Service</i>
VLR	<i>Visitor Location Register</i>

VoLGA	<i>Voice Over LTE via Generic Access</i>
VoLTE	<i>Voice over LTE</i>
WSN	<i>Wireless Sensors Network</i>

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La nueva generación de comunicaciones móviles, conocida popularmente como 5G, presenta una serie de características técnicas que le permitirá satisfacer las nuevas demandas de interconexión. Las nuevas prestaciones técnicas que incorpora la tecnología 5G, permitirán que se aplique a industrias verticales, como la automatización de factorías, la industria automovilística, el sector de la energía, la atención sanitaria y el sector del transporte por carretera, ferroviario y metropolitano, entre otras. Estos potenciales avances serán posibles, en gran medida, gracias a la utilización masiva de sensores, que permitirán la digitalización de estos sectores y el despliegue de denominado “Internet de las Cosas” que será posible gracias al 5G.

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es realizar un estudio y análisis del impacto que las futuras tecnologías 5G podrían tener en uno de estos mercados verticales, en concreto, en el sector ferroviario de alta movilidad.

La consecución de este objetivo comporta las siguientes actuaciones:

- a) Se realizará un estudio y análisis de las prestaciones teóricas de la tecnología 5G, proporcionando una visión general de las posibilidades técnicas de la misma, así como una descripción de sus potenciales aplicaciones en distintos escenarios de despliegue. Se prestará especial atención al escenario ferroviario, objeto del presente TFG. En esta visión general, se examinarán las bandas de frecuencias potenciales para su despliegue y el espectro propuesto para su utilización, así como las frecuencias que actualmente se están considerando para su futura estandarización.
- b) Se realizará un análisis de los sistemas de comunicaciones utilizados actualmente en el ferrocarril examinando las distintas funciones y los parámetros técnicos exigidos para satisfacer las necesidades demandadas.
- c) Se presentará una clasificación y descripción de los sistemas de comunicaciones en función de su operativa en el sector ferroviario. Así se hablará de servicios de comunicaciones para el control y seguridad del tren, de sistemas desplegados en la infraestructura ferroviaria, sistemas de comunicaciones desplegados en los escenarios ferroviarios y sistemas de comunicaciones para la información y satisfacción del viajero.
- d) Por último, se elaborará y presentará una propuesta de despliegue de servicios y tecnologías 5G en el entorno ferroviario. Se analizará su impacto en diversos aspectos de la operativa ferroviaria, como: 1) Requisitos específicos de la tecnología 5G para satisfacer las exigencias técnicas de la operativa ferroviaria, 2) El *roadmap* tentativo para el despliegue de servicios 5G y 3) El impacto que las tecnologías 5G tendrían en la infraestructura radio de la próxima generación de trenes.

2. VISIÓN GENERAL DE 5G: NUEVO ESCENARIO PARA LAS COMUNICACIONES

En el año 2012 se introdujeron los servicios actuales de comunicaciones 4G (Cuarta Generación de telefonía móvil), ofreciendo a los usuarios mayores velocidades de descarga de datos y menores latencias que los estándares anteriores (2G y 3G). Con los avances en tecnología móvil se han creado una gran cantidad de dispositivos conectados a Internet, conocidos también como IoT, debido a ello ha aumentado la proliferación de una gran variedad de aplicaciones nuevas haciendo que se incremente el uso de datos por parte de los usuarios. Con este aumento del consumo de datos también ha cambiado la forma de comunicarse y están desapareciendo los servicios tradicionales de telecomunicaciones como pueden ser las líneas fijas, las llamadas de voz por servicio fijo o la mensajería móvil convencional (SMS/MMS). [1]

Cada generación nueva ha incrementado aún más el número de usuarios, usos y aplicaciones posibles. De este modo, se prevé que el 5G (Quinta Generación de telefonía móvil) se adaptará a las nuevas necesidades, debidas al gran incremento de dispositivos móviles y a la creación e innovación de servicios y tecnologías móviles, pudiendo aumentar hasta 1000 veces la capacidad de los sistemas actuales [2], posibilitando la conexión masiva de dispositivos de forma simultánea (hasta 100 billones de dispositivos cuando se encuentre afianzado [3]), ofreciendo velocidades máximas de descarga de hasta 20 Gbps [4] (siendo la media máxima teórica de 10 Gbps para usuarios individuales [3]) con retardos de menos de 1 ms [2] y un servicio con una mayor calidad uniforme, reduciendo los costes y aumentando la eficiencia de energía así como la robustez del servicio.

2.1. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LAS PRESTACIONES TEÓRICAS Y DE LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS Y TÉCNICAS DE 5G

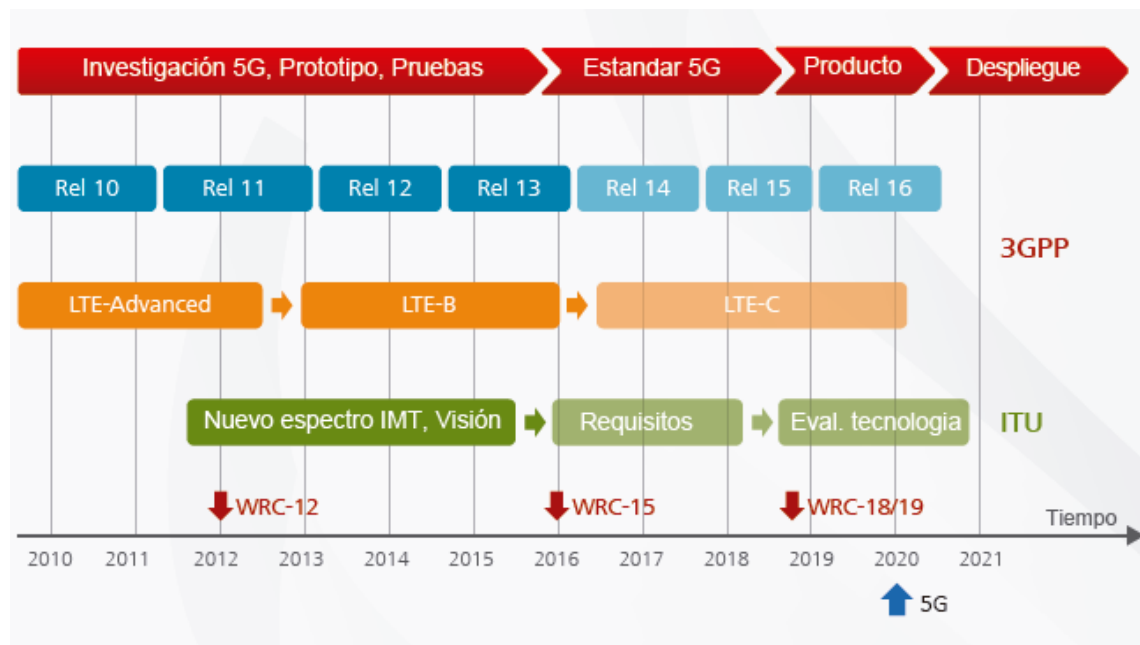


Figura 1. Evolución temporal del 5G [5]

Como se puede observar en la Figura 1, la comercialización del 5G no se hará hasta el año 2020, pero en la Tabla 1 se puede ver la comparativa de las características entre los servicios de 4G y lo previsto para los de 5G: [6]

Características	4G	5G
Latencia	10 ms	Menos de 1 ms
Velocidad máxima	1 Gbps	20 Gbps
Número de dispositivos	8 billones (2016)	11 billones (2021)
Ancho de banda del canal	Hasta 20 MHz. (Ancho de banda variable)	100 MHz por debajo de 6 GHz. 400 MHz por encima de 6 GHz
Banda de frecuencia	600 MHz a 5,925 GHz	600 MHz a bandas milimétricas (por ejemplo, 28 GHz, 39 GHz, y superiores a 80 GHz)
Forma de onda del enlace ascendente	SC-FDMA ('Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única')	Posiblemente CP-OFDM ('Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales con Prefijo Cíclico')
Potencia transmitida por el terminal de usuario	+26 dBm (excepto TDD a 2,5 GHz). +26 dBm en la banda 41 (2.500 MHz). +20 dBm para IoT	+26 dBm para bandas inferiores a 6 GHz y superiores a 2,5 GHz.

Tabla 1. Comparación entre 4G y 5G [6]

Estos logros de la quinta generación se conseguirán gracias a las distintas tecnologías y técnicas que utilizará y de las que podrá beneficiarse: [7]

- **MIMO masivo:** se trata de una extensión del concepto MIMO ('Múltiples Entradas Múltiples Salidas') con el uso de cientos de antenas en la estación base, posibilitando la multiplexación espacial y el *beamforming* ('conformación de haz') para ofrecer cobertura por rayos en vez de por celdas, logrando triplicar la eficiencia espacial de las configuraciones de *LTE-A* (también conocido como 4G Avanzado).
- **Bandas por encima de los 6 GHz:** la nueva tecnología posibilitará comunicaciones en bandas de frecuencias milimétricas (rango de frecuencias comprendido entre 30 GHz y 300 GHz, con longitudes de onda del orden de milímetros), entre 6 GHz y 100 GHz para celdas pequeñas, de manera que se obtendrá un espectro más amplio (10 veces mayor aproximadamente) así como canales más anchos (hasta un 1 GHz) permitiendo velocidades mucho mayores.
- **Nueva transmisión radio multiportadora:** utilizando esquemas que incluyen transmisión de FBMC, UFMC y GFDM para conseguir una menor latencia en el enlace ascendente gracias a los menores requisitos de sincronización, y una mejor adaptación para el espectro compartido debido al confinamiento de la transmisión en el espectro.
- **Transmisión múltiple no ortogonal:** el NOMA ('Acceso Múltiple No Ortogonal') y el SCMA ('Acceso Múltiple por Dispersión de Código') pueden complementar los accesos ortogonales (que eliminan las interferencias y crean capacidades altas, pero necesitan una señalización extensa y aumenta el retardo) aprovechándose de las técnicas avanzadas de cancelación de interferencias consiguiendo reducir la latencia para pequeñas cargas.
- **Acceso de espectro compartido:** los futuros sistemas inalámbricos (de LTE y de 5G) pueden comunicarse con sistemas de acceso de espectro planificado que gestiona el espectro entre los usuarios primarios (titulares, como el gobierno), secundarios (con licencia) y terciarios (sin licencia) haciendo más eficiente el uso del espectro para escenarios en los que los usuarios primarios utilizan ligeramente el espectro.
- **Coordinación entre nodos avanzada:** gracias a la utilización de accesos radio basados en la nube se conseguirá una mejor coordinación entre estaciones base logrando una mayor capacidad de la red.
- **Recepción y transmisión simultáneas:** utilizando métodos avanzados de cancelación de interferencia, los sistemas podrán transmitir y recibir a la vez, especialmente en entornos de transmisión de baja potencia como las celdas pequeñas, doblando la capacidad y mejorando el control de los accesos radio.

- **Tecnologías de acceso radio múltiple:** mediante métodos virtuales se logrará la integración de sistemas Wi-Fi, 3G y 4G para definir funciones de red bajo demanda y conseguir una red más adaptada a los usuarios de manera automática basada en sus requisitos y en las cargas de la red.
- **Comunicaciones D2D ('Dispositivo a Dispositivo'),** también conocidas como M2M ('Máquina a Máquina'): con estas comunicaciones se extenderá la cobertura y se transmitirán los mismos datos a varios terminales de una forma más eficiente mejorando el acceso a la información por parte de los usuarios y haciendo que la red sea más eficiente.
- **Integración de acceso/transporte inalámbrico:** haciendo del enlace inalámbrico una red de múltiples saltos, se podrán manejar ambas funciones bajo la misma tecnología mejorando la flexibilidad en el despliegue de redes con muchos usuarios.
- **Redes flexibles:** las redes estarán completamente virtualizadas basándose en NFV ('Virtualización de Funciones de Red') y en SDN ('Redes Definidas por Software'), minimizando los costes de despliegue y operacionales y haciendo que la red se adapte a los requisitos variables.
- **Núcleo de red independiente de la tecnología de acceso radio:** el núcleo de red soportará múltiples tipos de RAN ('Red de Acceso por Radio'), disminuyendo los costes de despliegue y operacionales con flexibilidad para adaptarse a nuevas tecnologías.
- **Mantenimiento de RAN basado en la nube:** la centralización de las funciones de los RAN, como la capa MAC ('Control de Acceso al Medio'), facilitarán las celdas neutrales de servidores, disminuirán los costes de despliegue y mejorarán el funcionamiento.
- **Network Slicing:** mediante NFV y SDN se segmentará la red para servicios inalámbricos virtuales dedicados a casos de uso específicos mejorando la flexibilidad del servicio ("particiones" virtuales de la red para cada servicio).
- **Tecnologías futuras:** ajustando los sistemas de manera que se minimice el número de señales de difusión, por ejemplo, transmitiendo juntas las señales de referencia y la carga, se mejorará el funcionamiento (eficiencia y cobertura) y se facilitará el despliegue de nuevas capacidades de los RAN en el futuro.

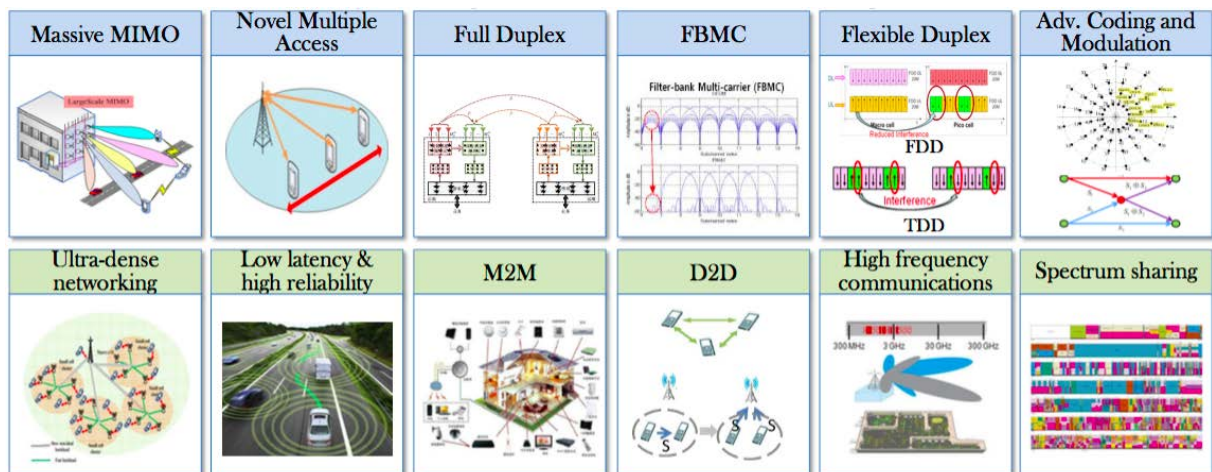


Figura 2. Tecnologías 5G [8]

2.2. POTENCIALES APLICACIONES

Esta nueva generación de comunicaciones también aportará grandes mejoras y beneficios a las industrias que tienen un sector de actividad definido con un claro nicho de mercado, también conocidas como industrias verticales. Gracias a los avances que se están llevando a cabo en la transformación digital de las industrias, sobre todo en los medios y procesos de producción y en la gestión de la relación con el cliente, se habla de que se está produciendo una cuarta revolución industrial, llamada Industria 4.0 o Industria inteligente. Esto se debe a la adaptación de las

compañías a las nuevas tecnologías, donde han tenido un gran impacto tanto el IoT como el Análisis de Datos a gran escala (*Big Data*), entre otras tecnologías.

Gracias al 5G se producirán importantes avances en este ámbito, principalmente en el uso simultáneo de multitud de sensores y/o dispositivos y en los procesos de control, mantenimiento y seguridad. A continuación señalaremos algunas de las principales tendencias que se producirán en estas industrias verticales y que serán posibles gracias a esta nueva generación de comunicaciones, así como de los avances que se van producir: [9]

- **Factorías automatizadas:** se incrementará el uso de robots para automatizar las líneas de producción y así mejorar su eficiencia. También se conectarán los distintos puntos de producción con los proveedores y los puntos de logística. Esto supone la necesidad de utilizar los recursos energéticos de manera eficiente para las comunicaciones y soportar una gran cantidad de datos para compartir la información obtenida. Dentro de estas factorías destacan la automatización de los procesos industriales, las líneas de producción automatizadas, la optimización de las cadenas de inventario y distribución, las comunicaciones entre empresas y dentro de la misma, y el Internet de las Cosas remoto.
- **Industria automovilística:** gracias al 5G se producirán grandes avances en este sector en los ámbitos de la conducción asistida, la conducción autónoma, la conducción teledirigida y los contenidos audiovisuales dentro del vehículo.
- **Energía:** se podrán mejorar y hacer más eficientes el uso y la distribución de la energía organizando de manera adecuada los niveles de generación para minimizar los vacíos entre la oferta y la demanda y minimizar el gasto proveyendo energía sólo cuando sea necesario. Las comunicaciones 5G aportarán la inteligencia necesaria para implementar la nueva infraestructura y mantenimiento de la distribución, así como los nuevos modelos de negocio como la red eléctrica inteligente, en el transporte y la red principal, y en las comunicaciones de la red de acceso.
- **Atención sanitaria:** se podrá mejorar la asistencia médica mediante aplicaciones en los móviles (*mHealth*) y otras tecnologías inalámbricas de cuidados médicos para enseñar a los usuarios servicios de cuidados preventivos, también se hará mediante el uso de la información y las tecnologías de comunicaciones (*eHealth*) para distribuir servicios e información a través de Internet para llegar a la gente mediante dispositivos inalámbricos, así como el manejo remoto de robots para cirugía. Gracias a la nueva generación de comunicaciones será posible la monitorización remota de los pacientes mediante sensores y *wearables*, llevar a cabo cuidados médicos a distancia o la cirugía remota, entre otros.
- **Contenidos multimedia y entretenimiento:** con el incremento de la variedad de dispositivos como televisiones inteligentes, móviles, *tablets*, *wearables* y otros, como de la diversidad de servicios multimedia como contenidos en directo, bajo demanda, generados por el usuario y de juegos *online*, será necesaria una velocidad de descarga mucho mayor que la actual. También se necesitarán velocidades más altas en el enlace ascendente debido al incremento del uso de las redes sociales como *Facebook* o *Instagram* en las que los usuarios suben contenido para compartirlo con otros usuarios. Con el 5G se podrán alcanzar las velocidades necesarias y la conexión con los usuarios móviles y estáticos.
- **Smart Railway ('Tren Inteligente'):** con la nueva generación de comunicaciones y gracias al uso de sensores y la digitalización de los servicios y su gestión basada en la nube, los trenes serán más eficientes, seguros e interconectados. De esta manera se ofrecerán soluciones más adaptadas y rápidas (algunas en tiempo real y/o con predicción inteligente) a los problemas existentes o futuros gracias al análisis de *Big Data* y al Internet de las Cosas con los que se mejorará la operativa y la seguridad de los trenes. La experiencia de los pasajeros en este tipo de

trenes también mejorará gracias a la mayor calidad de los servicios ofrecidos, a la consulta de información en tiempo real y a la digitalización de servicios como el *e-ticketing*. [10]

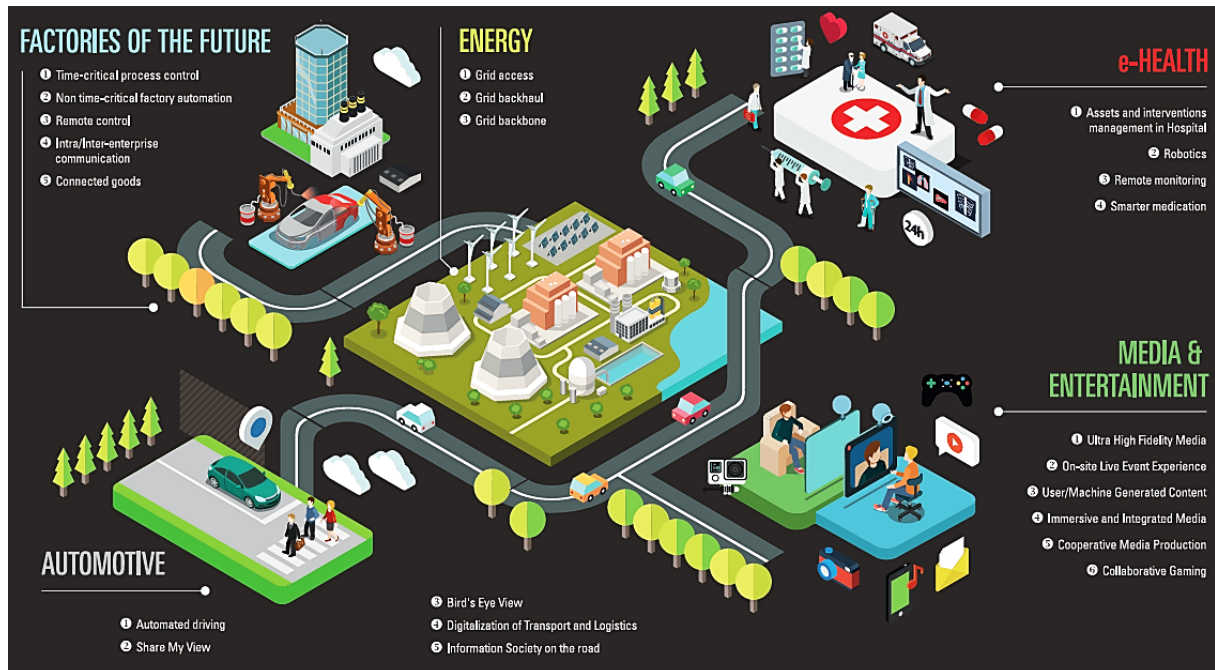
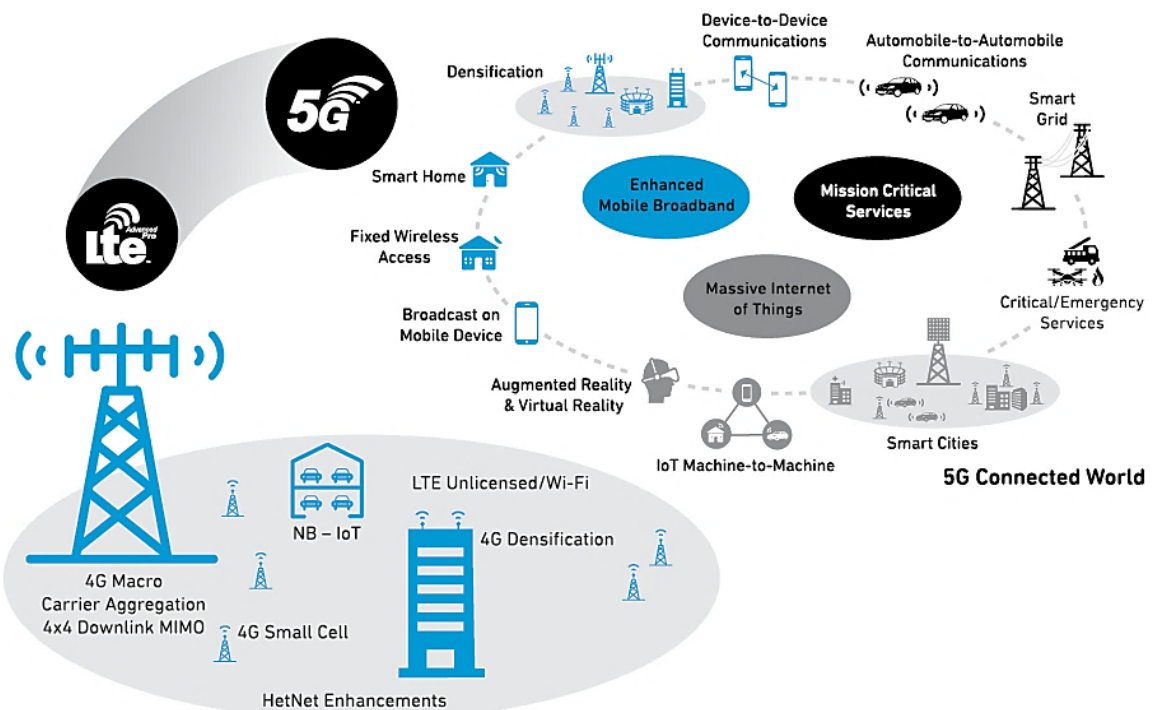


Figura 3. Industria 4.0 [11]

2.3. NUEVOS ESCENARIOS PARA LAS COMUNICACIONES

2.3.1 Escenarios de uso

La ITU-R ('Unión Internacional de Telecomunicaciones – Radiocomunicaciones') ha definido tres escenarios principales de uso que explicaremos antes de desarrollar los escenarios de despliegue para entender mejor las comunicaciones 5G:



4G LTE Evolution - Laying the Foundation for 5G

Figura 4. Escenarios de 5G [6]

2.3.1.1 Banda ancha móvil mejorada (eMBB)

Tiene como objetivo satisfacer el aumento de la demanda, centrándose en servicios que necesitan anchos de banda muy grandes. Requiere de un servicio con velocidades elevadas y latencias bajas en algunas áreas determinadas, y de accesos fiables para cubrir grandes áreas. Estos servicios ofrecen un alto rendimiento en entornos urbanos densos, rurales, de movilidad e interiores.

Algunas de las tecnologías que utilizan estas aplicaciones son: *LTE-A* y *LTE-A Pro*, banda ancha, accesos inalámbricos fijos, bandas milimétricas, infraestructuras de direccionamiento de rayos y celdas pequeñas eficientes.

Para soportar grandes cantidades de dispositivos conectados se necesita un espectro adicional, por lo que se prevé la utilización tanto de espectro con licencia como sin licencia. Se pretende conseguir velocidades y capacidades grandes utilizando frecuencias altas, de ahí la utilización de bandas milimétricas cuyo rango va desde los 30 GHz hasta los 300 GHz consiguiendo anchos de banda de canal de 400 MHz utilizando antenas de transmisión y recepción pequeñas [6]. El rango de estas ondas está limitado a unos cientos de metros ya que no penetran materiales sólidos muy bien y pierden más energía que las ondas de frecuencias más bajas en distancias largas (debido a su absorción o dispersión causada por los gases, la lluvia y la vegetación).

eMBB se utilizará para usuarios estáticos en entornos interiores con requisitos de velocidades altas (por ejemplo, realidad virtual, realidad aumentada, juegos online y contenidos multimedia bajo demanda) y para usuarios en movimiento en entornos interiores y exteriores y/o con gran densidad de usuarios alrededor (por ejemplo, noticias e información, centros comerciales, estadios, vehículos aéreos no tripulados, trenes de alta velocidad y servicios en la nube). [6] [12] [13]

2.3.1.2 Comunicaciones tipo máquina masivas (mMTC)

Consiste en muchos dispositivos distintos operando en diversos ambientes (áreas amplias y en interiores con penetración profunda) que utilizan estándares de 4G LTE e introducirán en un futuro las capacidades del 5G. El mayor reto se encuentra en la habilidad para dar conexión a terminales en entornos con muchos dispositivos, por lo que las redes que soporten mMTC deberán ser masivamente escalables, baratas y eficientes en términos de energía, y tendrán que ser capaces de enviar grandes cantidades de datos pequeños.

Estos servicios se centran en las comunicaciones M2M, pudiendo conectar cualquier cosa en cualquier lugar con interacción humana mínima o nula, incluyendo en este escenario los dispositivos de IoT. Estas aplicaciones consisten, normalmente, en dispositivos baratos de baja potencia que posibilitan una buena cobertura punto a punto y transmiten información a la nube.

Como los paquetes de datos que se necesitan enviar en estos sistemas son pequeños se puede utilizar un ancho de banda de canal estrecho, lo que permite utilizar frecuencias bajas (por debajo de 1 GHz) donde el espectro es limitado pero el rango que abarcan las ondas en estas bandas es amplio.

Algunas de las tecnologías que utilizan estas aplicaciones son: conexión RF (de Radio Frecuencia) de baja potencia, *ZigBee* (protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión de bajo consumo), *Wi-Fi*, redes celulares 4G, redes celulares 5G y *Thread* (protocolo de red inalámbrica diseñado para dispositivos conectados en IoT).

Se utilizará para entornos que tienen grandes densidades de usuarios/dispositivos como el despliegue masivo de sensores y accionadores, controles y sensores remotos de coches, *wearables* y videovigilancia. [6] [12] [13]

2.3.1.3 Comunicaciones ultra fiables de baja latencia (uRLLC)

Estos sistemas necesitan una gran fiabilidad de enlace con latencias mínimas en los enlaces de comunicación. También requieren control en tiempo real a grandes velocidades con máxima disponibilidad para asegurar conexiones continuas y comunicaciones extremadamente seguras para

tener un control de los datos, la privacidad y la seguridad de las personas, por este motivo también se conocen como servicios de misión crítica.

Para asegurar la fiabilidad de estos servicios se tiene que tener en cuenta el aumento de las conexiones que se producirá en 5G, por lo que se deberá lidiar con el incremento del tráfico mediante la utilización de conexiones a través de celdas pequeñas con redes inalámbricas fijas y empleando el espectro entre 600 MHz y 80 GHz.

Las tecnologías clave para servicios uRLLC son: bandas milimétricas, MIMO, conformación de haz, agregación de portadoras e infraestructura 5G (como accesos de banda ancha, sistemas GPS, conexiones punto a punto y comunicaciones satélite).

Se aplica en casos que precisan de alta fiabilidad y disponibilidad con densidades de usuarios relativas como comunicaciones de emergencia, seguridad y tráfico eficiente, tecnologías de salud, manipulación remota de objetos (maquinaria, coches, drones, ...) y vehículos autónomos. [6] [12] [13]

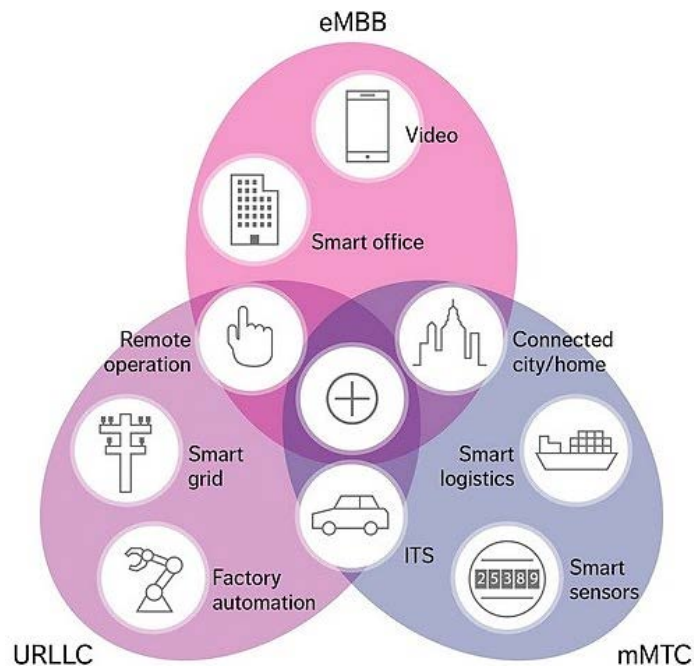


Figura 5. Escenarios de uso [14]

2.3.2 Escenarios de despliegue

A continuación hablaremos de los escenarios de despliegue para eMBB, mMTC y URLLC, como de algunas de sus características propuestas: [15]

2.3.2.1 Puntos de acceso en interiores

Este escenario se centra en coberturas pequeñas por TRxPs ('Puntos de Transmisión y Recepción') y en altos rendimientos de usuario con un gran número de personas dentro de edificios.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	30 GHz / 70 GHz / 4 GHz
Ancho de banda	1 GHz / 1 GHz / 200 MHz
Distancia entre puntos	20 m

Tabla 2. Características de puntos de acceso en interiores [15]

2.3.2.2 Entornos urbanos densos

En ellos se desplegará una red microcelular centrada en macro TRxPs con o sin micro TRxPs y grandes densidades de usuarios y tráfico de datos con coberturas exteriores y de exteriores a interiores en el centro de ciudades y áreas urbanas con aglomeraciones.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	4 GHz + 30 GHz
Ancho de banda	200 MHz / 1 GHz
Distancia entre puntos	200 m

Tabla 3. Características de entornos urbanos densos [15]

2.3.2.3 Entornos rurales

Son coberturas largas y continuas, centrándose en vehículos que van a velocidades altas en áreas extensas. Este escenario tiene ruido limitado y/o interferencia limitada usando macro TRxPs.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	700 MHz / 2 GHz / 4 GHz
Ancho de banda	20 MHz / - / 200 MHz
Distancia entre puntos	1732 m – 5000 m

Tabla 4. Características de entornos rurales [15]

2.3.2.4 Macroentornos urbanos

Estos entornos se basan en celdas grandes para ofrecer coberturas continuas en ciudades. Utilizando macro TRxPs se limitará la interferencia (por ejemplo, puntos de acceso por encima de las azoteas de los edificios).

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	2 GHz / 4 GHz / 30 GHz
Ancho de banda	- / 200 MHz / 1 GHz
Distancia entre puntos	500 m

Tabla 5. Características de macroentornos urbanos [15]

2.3.2.5 Entornos de alta velocidad

Este escenario trata de dar cobertura continua a lo largo de los vagones en trenes de alta velocidad posibilitando experiencias consistentes a los usuarios y fiabilidad en las comunicaciones críticas del tren con velocidades muy altas.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	4 GHz / 30 GHz / 70 GHz
Ancho de banda	200 MHz / 1 GHz / 1 GHz
Distancia entre puntos	1732 m entre unidades radio con 2 TRxPs
	580 m entre unidades radio con 1 TRxPs
	1732 m entre unidades banda base

Tabla 6. Características de entornos de alta velocidad [15]

2.3.2.6 Áreas con poca población y coberturas amplias

Se centra en proveer servicios para áreas amplias con pocos usuarios entre personas y máquinas. La utilización de macroceldas dará cobertura a estas áreas soportando velocidades básicas de datos y servicios de voz con rendimientos de usuario moderados y pocos usuarios.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	Por debajo de 3 GHz: prioridad para 1 GHz / 700 MHz
Ancho de banda	40 MHz
Distancia entre puntos	100 kms

Tabla 7. Características de áreas con poca población y coberturas amplias [15]

2.3.2.7 Entornos urbanos con cobertura para conexiones masivas

Se centra en el uso de grandes celdas y cobertura continua en áreas urbanas con un amplio despliegue de dispositivos para ofrecer servicios mMTC.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	700 MHz / 2100 MHz
Distancia entre puntos	1732 m / 500 m

Tabla 8. Características de entornos urbanos con cobertura para conexiones masivas [15]

2.3.2.8 Autopistas

Trata de ofrecer fiabilidad y disponibilidad de los servicios a vehículos en movimiento con altas velocidades en autopistas.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	Por debajo de 6 GHz
Ancho de banda	200 MHz
Distancia entre puntos	1732 km

Tabla 9. Características de autopistas [15]

2.3.2.9 Red urbana de coches conectados

Es un escenario de despliegue amplio con una gran cantidad de coches en entornos urbanos en el que las autopistas/autovías llegan hasta la ciudad. Los usuarios necesitan fiabilidad, disponibilidad y bajas latencias en redes con grandes cargas de datos y usuarios.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	Por debajo de 6 GHz
Ancho de banda	200 MHz
Distancia entre puntos	500 m

Tabla 10. Características de la red urbana de coches conectados [15]

2.3.2.10 Escenario comercial aire-tierra

Se centra en ofrecer servicios para aeronaves comerciales para permitir a las personas y máquinas a bordo iniciar y recibir servicios móviles. Con macroceldas se abarca áreas extensas que soportan servicios básicos de voz y datos con un rendimiento de usuario moderado para usuarios que están a elevadas altitudes viajando a velocidades altas.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	Por debajo de 4 GHz
Ancho de banda	40 MHz
Distancia entre puntos	100 km

Tabla 11. Características del escenario comercial aire-tierra [15]

2.3.2.11 Escenario de aeronaves pequeñas

Este escenario provisiona de servicios a aeronaves generales como helicópteros o avionetas posibilitando las conexiones con las personas y máquinas que se encuentran a bordo. Como en el caso anterior, se utilizarán macroceldas para abarcar áreas extensas soportando servicios básicos de voz y datos con un rendimiento de usuario moderado para usuarios que están a elevadas altitudes viajando a velocidades altas.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	Por debajo de 4 GHz
Ancho de banda	40 MHz
Distancia entre puntos	100 km

Tabla 12. Características del escenario de aeronaves pequeñas [15]

2.3.2.12 Extensión satélite-tierra

Este despliegue trata de provisionar a aquellas áreas donde el servicio terrestre no está disponible y para aquellos servicios que son más eficientes soportados por sistemas satélite como los servicios de difusión. Estos servicios se suelen ofrecer a áreas rurales o autopistas.

Características	Valores propuestos
Frecuencia de portadora	1,5 o 2 GHz / 20 o 30 GHz / 40 o 50 GHz
Ancho de banda	2*10 MHz / 2*250 MHz / 2*1000 MHz

Tabla 13. Características de la extensión satélite-tierra [15]

3. BANDAS DE FRECUENCIAS POTENCIALES PARA EL DESPLIEGUE DE 5G

Las investigaciones para identificar las bandas de frecuencias de uso de la quinta generación han llegado a las conclusiones de que para alcanzar velocidades de 20 Gbps son necesarias portadoras de al menos 1 GHz y anchos de banda grandes (utilizando frecuencias superiores a 5 GHz). Por lo que, a parte de las bandas de frecuencias existentes para los sistemas LTE, los investigadores están estudiando las opciones de espectros a frecuencias altas, incluyendo bandas de frecuencias de *cmWaves* (de 3 GHz a 30 GHz) y bandas milimétricas (de 30 GHz a 300 GHz), donde se puede disponer de un espectro mucho más amplio que en el de LTE.

Aunque, de momento, no hay un espectro de frecuencias estandarizado para el 5G, las bandas propuestas se pueden dividir en tres tramos: banda baja (por debajo de 1GHz, bandas UHF (rango de frecuencias de 300-3000 MHz)), banda media (entre 1 GHz y 6 GHz) y banda alta (a partir de 28 GHz). [6]

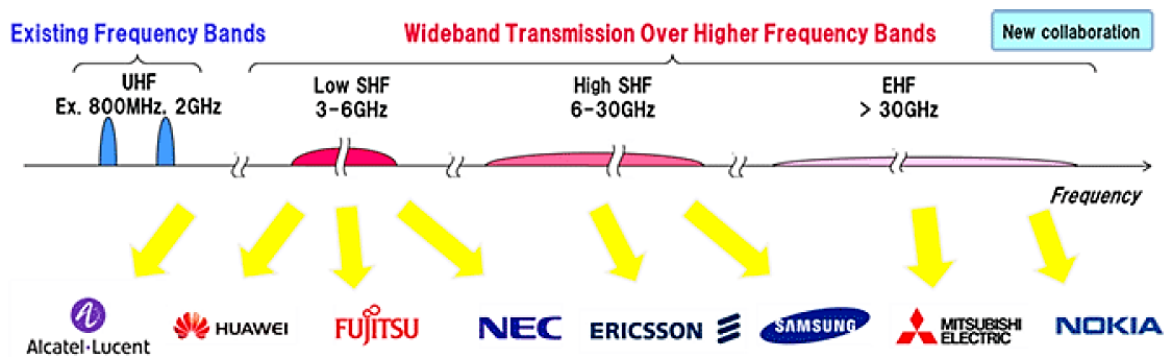


Figura 6. Bandas de frecuencias y empresas que están haciendo pruebas experimentales de 5G [16]

La Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2015 (CMR-15) hizo grandes progresos al identificar nuevas bandas de frecuencias a escala mundial por debajo de 6 GHz para el funcionamiento de las IMT ('Telecomunicaciones Móviles Internacionales') y al abrir las bandas del "segundo dividendo digital" (bandas de 700 MHz) con su posterior liberalización en 2020 para el 5G. Como estos sistemas pueden necesitar mayores bloques de espectro contiguos a frecuencias más altas en un futuro, la CMR-15 pidió a la ITU-R que estudiase 11 bandas de frecuencias en el espectro de 24 GHz a 86 GHz como posibles bandas de IMT para la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2019. Además, en la CMR-19 de la ITU se examinará la necesidad de espectro adicional para dar apoyo al futuro crecimiento de las IMT. [17] [18]

Las bandas propuestas por la ITU-R en estas conferencias son las siguientes: [7] [19]

- 700 MHz
- 1427 – 1518 MHz
- 3,4 – 3,6 GHz
- 24,25 – 27,5 GHz
- 31,8 – 33,4 GHz
- 37 – 40,5 GHz
- 40,5 – 42,5 GHz
- 45,5 – 50,2 GHz
- 50,4 – 52,6 GHz
- 66 – 76 GHz
- 81 – 86 GHz

El programa 5G PPP ('Asociación de infraestructura Público-Privada de 5G') es una iniciativa conjunta entre la Comisión Europea y la Industria TIC europea en la que se propondrán soluciones, arquitecturas, tecnologías y estándares para la siguiente generación de infraestructuras de comunicación para que la industria europea sea competente en el mercado mundial. Se llevará a cabo en tres fases con, aproximadamente, 20 proyectos trabajando paralelamente en cada fase: la primera fase comenzó en julio de 2015, en ella se estudiaron varios aspectos como los requisitos necesarios, las tecnologías de la RAN, estudio inicial de bandas de frecuencia, etc. y se llevó a cabo una especificación temprana del 5G que se completará en las siguientes fases; tras finalizarse, en junio de 2017 comenzó la segunda fase, la cual se está llevando a cabo, continuando con la investigación y realizando prototipos y pruebas, se prevé que termine en julio de 2019 dando comienzo a la tercera fase en la que se realizarán más pruebas y estarán disponibles nuevas bandas de frecuencias, esta última fase finalizará en agosto de 2020.

La primera fase contenía siete proyectos que han contribuido en el ámbito del espectro: [19]

- **5G – Crosshaul:** integración de opciones inalámbricas de *backhaul/fronthaul* (redes de retorno/redes punto a punto) en las bandas de frecuencia por encima de los 100 GHz, con atención particular al rango de 50 – 90 GHz.
- **5G – Xhaul:** centrada en la banda de 60 GHz para *backhaul/fronthaul*.
- **COHERENT:** esquemas de gestión para espectro compartido.
- **FANTASTIC 5G:** acceso al espectro por debajo de 6 GHz.
- **METIS – II:** base del espectro y aspectos técnicos del mismo.
- **mmMAGIC:** espectro por encima de 6 GHz, incluyendo bandas milimétricas, para el acceso de comunicaciones móviles y *backhaul* propio.
- **Speed – 5G:** gestión inteligente de recursos tecnológicos de acceso radio múltiple y acceso espectral dinámico.

En estos proyectos se han estimado los requisitos de espectro que necesitan 10 casos de uso:

Caso de uso	BW enlace descendente (MHz)	BW enlace ascendente (MHz)
Contenidos multimedia bajo demanda	500	10
Servicios en la nube (entornos de pico celdas)	300	50
Entorno urbano denso con aglomeraciones distribuidas	1175	2350
Oficina inteligente	1000	270
Experiencia inmersiva 5G	1640	820
+50 Mbps en cualquier lugar	588	294
Puntos móviles (repetidores/celdas en vehículos)	100	50
Puntos móviles (sin celdas en vehículos/repetidores)	50000	25000
Cirugía remota/control robótico	500	10
Internet táctil	10	10

Tabla 14. Anchos de banda de algunos casos de uso [20]

3.1. PRINCIPALES BANDAS DE FRECUENCIAS DE 5G EN ESPAÑA

El Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital publicó el 1 de diciembre de 2017 el Plan Nacional 5G, en el que se muestra la línea de gestión y planificación del espectro radioeléctrico en España para las comunicaciones 5G entre el año 2018 y 2020. [21]

En abril de 2018 se aprueba la última modificación de la tabla de atribución de frecuencias del CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias) en la que se considera la banda de 3,4-3,8 GHz como la banda principal para la introducción de servicios basados en 5G en Europa, incluso antes de 2020 [22], y, por lo tanto, se identifica como banda prioritaria. [23]

En España, en esta banda ya existen 4 concesiones de dominio público a 4 operadores, cada una de las cuales habilita al uso de 40 MHz, quedando disponibles 260 MHz. Por lo que, a través de la nota UN-107 (Nota de Utilización nacional 107), el CNAF fija un límite máximo de 120 MHz a utilizar por un operador o grupo empresarial. [23]

En el Plan Nacional 5G se definen las siguientes bandas de frecuencias como principales para el despliegue de 5G:

Banda de frecuencias	Situación en territorio nacional
700 MHz	<p>Uso actual: difusión de TDT (Televisión Digital Terrestre). Futura liberación de la banda con el “segundo dividendo digital” (2020). Futuro uso para la prestación de servicios de comunicaciones electrónicas. Posible uso restringido en determinadas zonas geográficas para proyectos piloto.</p>
3,4 – 3,6 GHz	<p>Adjudicada y susceptible de ser utilizada para prestación de servicios 5G. Con carácter prioritario para los servicios de comunicaciones electrónicas, tras la liberación de sus usos anteriores. (No se autorizarán nuevos usos para el servicio fijo punto a punto y punto a multipunto). Las subbandas 3485-3495 MHz y 3585-3595 MHz se destinan a uso prioritario por el Estado en sistemas del Ministerio de Defensa para el servicio de radiolocalización en determinadas localizaciones, donde gozarán de la protección de un servicio primario. Las subbandas 3480-3485 MHz, 3495-3500 MHz, 3580-3585 MHz y 3595-3600 MHz constituyen bandas de guarda para asegurar la compatibilidad entre los servicios de comunicaciones electrónicas y de radiolocalización. (Podrán ser destinadas al servicio de comunicaciones electrónicas en aquellas zonas geográficas en las que pueda garantizarse la compatibilidad entre ambos servicios). (UN-107)</p>
3,6 – 3,8 GHz	<p>Destinada para sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas. Actualmente se encuentra disponible la licitación de los derechos de uso de la banda para servicios 5G, tras el correspondiente proceso de liberación de sus anteriores usos. Subasta del espectro en julio de 2018.</p>
26 GHz (24,25-27,5 GHz)	<p>Disponibles para uso inmediato 400 MHz en la parte baja de la banda, y 500 MHz (con algunas limitaciones) en la parte alta de la banda. La banda de frecuencias 24,25-27,5 GHz se destina, con carácter no exclusivo, a sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas en la Unión Europea. No se otorgarán nuevos títulos habilitantes de uso del espectro excepto para emisiones con fines experimentales. (El Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital ha habilitado su uso para el desarrollo de los proyectos piloto de tecnología 5G previstos en el Plan Nacional 5G [24]). Podrán mantenerse los usos actuales en determinadas porciones de la banda siempre que sean compatibles con la disponibilidad de la misma para los sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas, debiendo quedar la banda liberada de los usos actuales del servicio fijo a más tardar el 31 de diciembre de 2021. Lo anterior no será aplicable a la banda 25,5-27 GHz atribuida a los servicios de investigación espacial y exploración de la Tierra por satélite en sentido espacio-Tierra para las estaciones de Villafranca del Castillo, Cebreros y Robledo de Chavela. Mientras se mantengan los usos actuales del servicio fijo, se canalizará la banda 24,5-26,5 GHz para radioenlaces punto a punto y punto a multipunto. (UN-92)</p>

Tabla 15. Principales bandas de frecuencias para el despliegue de 5G en España [21] [22] [23] [24]

El Plan Nacional 5G establece que la SESIAD (Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y Agenda Digital) actuará sobre algunos factores críticos, en particular, en la convocatoria de proyectos piloto por la Entidad Pública Empresarial Red.es, y que para ello facilitará autorizaciones provisionales de rangos de frecuencias en las diversas bandas 5G, en particular en las bandas de 3,6-3,8 GHz y 26 GHz. [25]

El 26 de mayo de 2018 se publicó en el BOE (Boletín Oficial del Estado) la orden de convocatoria de una subasta, así como la aprobación del pliego y de las normas que la van a regir, para la licitación de los derechos de uso de las frecuencias de la banda de 3,6-3,8 GHz. Dichos derechos se refieren a 40 bloques de 5 MHz de ámbito estatal para comunicación TDD (‘Duplexación por División de Tiempo’), con las características de la UN-107. La licitación se llevará a cabo mediante una subasta simultánea ascendente de múltiples rondas que comenzará antes del 20 de julio de 2018 tras la admisión/rechazo de los licitadores, en la cual el precio de salida para cada bloque de 5 MHz es de 2.500.000,00€ y la duración de las licencias otorgadas será de 20 años sin posibilidad de renovación automática. [22]

4. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN EL FERROCARRIL

En los siguientes apartados se describirán y analizarán los sistemas de comunicaciones utilizados actualmente (GSM-R y TETRA), y posibles soluciones futuras (LTE y 5G), en entornos ferroviarios, incluyendo su estandarización, sus características principales, los servicios que ofrece, requisitos de funcionamiento y su posible continuidad en el futuro.

4.1. GSM-R

El sistema GSM ('Sistema Global para las Comunicaciones Móviles') se finalizó en 1990 como un estándar de telefonía móvil digital en Europa, facilitando por primera vez voz y datos digitales y el *roaming* internacional permitiendo al usuario traspasar las fronteras de los países [26].

Esta interfaz radio se ha implementado en las bandas de frecuencia de 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz, siendo la de 900 MHz la más extendida y utilizada. Utiliza acceso mediante FDMA/TDMA ('Acceso Múltiple por División de Frecuencia/Tiempo') con 25 MHz de ancho de banda total repartido en 124 portadoras con 200 kHz de ancho de banda cada una y modulación GMSK alcanzando velocidades de transmisión de 270,833 kbps de subida y bajada [27] [28].

La especificación de los sistemas GSM-R ('GSM para Ferrocarriles') se llevó a cabo en la década de los 90 en Europa con el estándar EIRENE ('Red Europea Integrada y Mejorada de Radio para el Ferrocarril'), basado en el proyecto MORANE ('Radio Móvil para Redes de Ferrocarriles en Europa') que realizó los tres primeros prototipos en las líneas Florencia-Arezzo, Stuttgart-Mannheim y París (líneas de alta velocidad del norte y del este), y actualmente el proyecto ERTMS ('Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario') de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) se encarga de su mantenimiento. [29] [30]

Actualmente es el sistema más utilizado para las comunicaciones en entornos ferroviarios, operando en 38 países alrededor del mundo, incluyendo los Estados miembros de la Unión Europea y países en Asia, América y el norte de África [31].

Las redes GSM-R proporcionan comunicaciones de voz y datos en entornos ferroviarios, aunque su principal uso es para servicios de voz, equipando aproximadamente 70000 km de vía para servicios de voz y 3000 km para datos para el sistema ETCS ('Sistema de Control Ferroviario Europeo') [32].

Este sistema se basa en el estándar GSM público y funciona en la banda de 900 MHz con el rango de 921-925 MHz para el enlace descendente y 876-880 MHz para el ascendente. Lo que equivale a 19 pares de frecuencias de uso de 200 KHz (incluyendo el tiempo de guarda), cada una con 8 canales de comunicación [33].

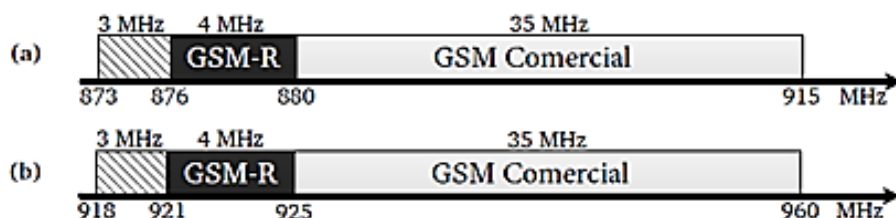


Figura 7. Espectro de frecuencias del enlace a) ascendente y b) descendente de GSM y GSM-R [33]

Las redes GSM-R se despliegan de forma celular, donde la estación base transmisora proporciona cobertura radio en su celda y establece la conexión entre el núcleo de la red y el servicio ofrecido. La transmisión se basa en la conmutación de circuitos, siendo necesario un circuito virtual punto a punto dedicado, de forma que los recursos de la red están reservados para una conexión en particular. Estas transmisiones también se llevan a cabo mediante FDD, transmitiendo el enlace ascendente y el descendente en frecuencias separadas. Para establecer múltiples llamadas por celda, cada canal de frecuencia se comparte entre terminales móviles mediante TDMA, dividiendo las transmisiones radio GSM-R en tramas de 8 *slots* en las que cada llamada ocupa un *slot* de tiempo en cada trama consecutiva, es decir, se pueden llevar a cabo 7 llamadas en un solo canal de

frecuencia (el *slot* restante se utiliza por la red para señalización). La modulación en este caso también es GMSK por su simplicidad en la implementación *hardware* y la baja interferencia de emisión. [34]

Como podemos observar, las principales características de GSM-R son las mismas que las comentadas anteriormente para GSM.

Características	GSM-900	GSM-R
Frecuencia	UL: 890-915 MHz DL: 935-960 MHz	UL: 876-880 MHz DL: 921-925 MHz
Ancho de banda de canal	200 kHz	200 kHz
Modulación	GMSK	GMSK
Acceso múltiple	FDMA/TDMA	TDMA
Velocidad máxima de transmisión	270,833 kbps	172 kbps
Velocidad de datos	9,6 kbps	9,6 kbps
Movilidad	350 km/h	500 km/h
Rango de la celda	≤ 35 km	≤ 8 km

Tabla 16. Comparación de las características de GSM y GSM-R

GSM-R amplía el sistema GSM para implementar funciones en entornos ferroviarios [33] [27]:

- **Multi-nivel mejorado de prioridad y preferencia (eMLPP):** es un mecanismo de calidad que establece prioridades a las llamadas y a las conexiones que tienen mayor importancia como pueden ser las llamadas de emergencia.
- **Direccionamiento funcional (FA):** permite a los usuarios llamar a ciertos destinos sin conocer el número de teléfono específico, es posible hablar con un conductor utilizando el número operativo del tren.
- **Direccionamiento dependiente de la localización (LDA):** selecciona de manera dinámica los destinos de la llamada basándose en el área en el que se encuentra el tren.
- **Servicios de llamada de grupo y de difusión de voz (VGCS y VBS):** la llamada de grupo permite comunicarse con un conjunto predefinido de usuarios y los servicios de difusión se utilizan para que un tren envíe mensajes de voz a un grupo determinado de ferrocarriles del área en el que se encuentra.
- **Llamada de emergencia de ferrocarril (REC):** se trata de un servicio de llamada de difusión con máximo nivel de prioridad que se lleva a cabo mediante un botón determinado con el que se establece la conexión con los terminales receptores y automáticamente comienzan a escuchar la llamada, aunque haya otra en curso.

Estos servicios de llamada tienen unos requisitos de establecimiento muy estrictos, ya que son la base de las comunicaciones de los trenes:

Tipo de llamada	Tiempo de establecimiento
Llamada de emergencia del tren	< 4s
Llamadas de grupo con prioridad alta	< 5s
Llamadas de grupo entre conductores de la misma área	< 5s
Llamadas operacionales con prioridad alta móvil-punto fijo no cubiertas por los tipos anteriores	< 5s
Llamadas operacionales con prioridad alta punto fijo-móvil no cubiertas por los tipos anteriores	< 7s
Llamadas operacionales móvil-móvil no cubiertas por los tipos anteriores	< 10s
Resto de llamadas	< 10s

Tabla 17. Tiempos de establecimiento de llamadas en GSM-R [31]

También se especifican requisitos de calidad para ofrecer la máxima calidad de los servicios, en la Tabla 18 se muestran los valores precisados para los % de calidad de servicio descritos:

Requisitos	Valores			Calidad		
Retraso de establecimiento de conexión de llamadas originadas en el móvil	< 8,5s	≤ 10s		95%	100%	
Ratio de error en el establecimiento de conexión	< 10 ⁻²			100%		
Ratio de pérdidas en la conexión	< 10 ⁻² /h			100%		
Máximo retraso en la transmisión punto a punto (de un bloque de datos de 30 bytes)	≤ 0,5s			99%		
Período de interferencia en la transmisión	< 0,8s	< 1s		95%	99%	
Período libre de errores	> 20s	> 7s		95%	99%	
Retraso en el registro de la red	≤ 30s	≤ 35s	≤ 40s	95%	99%	100%
Tiempo de establecimiento de llamada	≤ 10s			100%		
Tiempo de establecimiento de llamada de emergencia	≤ 2s			100%		
Duración de los fallos de transmisión	< 1s			99%		

Tabla 18. Requisitos de calidad de GSM-R [31]

Los servicios que deben soportar los distintos tipos de radio se describen a continuación, diferenciando entre su tipo de necesidad: Necesario para la Interoperabilidad (NI), Necesario para el Sistema (NS), Opcional (O) o No Aplicable (NA).

Grupo de servicio	Tipo de servicio	Cabina	Datos para ETCS	Propósito general	Operacional	Maniobras
Llamada de voz	Punto a punto	NI	NA	NI	NI	NI
	Emergencia pública	NS	NA	NI	NI	NI
	Difusión	NS	NA	NI	NI	NI
	Grupo	NI	NA	NI	NI	NI
	Múltiples	NI	NA	O	O	NI
Datos	Mensajes de texto	NI	NA	NI	NI	NI
	Aplicaciones generales	NS	O	O	O	O
	Fax automático	O	NA	O	O	O
	Control de tren de ETCS	NA	NI	NA	NA	NA
Herramientas específicas	Direccionamiento funcional (FA)	NI	NA	NI	NI	NI
	LDA	NI	NS	O	O	O
	Modo directo	NA	NA	NA	NA	NA
	Modo de maniobras	NI	NA	NA	NA	NI
	Comunicaciones entre múltiples conductores en el mismo tren	NI	NA	NA	NA	NA
	Llamadas de emergencia de trenes	NI	NA	O	NI	NI

Tabla 19. Servicios que deben soportar los distintos tipos de radio en GSM-R [31]

La arquitectura de la red GSM-R tiene tres principales subsistemas [33]:

- **Las estaciones móviles (MS):** son los terminales de usuario conectados de manera inalámbrica a la red.
- **El subsistema de estaciones base (BSS):** constituido por la estación base de control (BSC) y un número de estaciones base transmisoras (BTS). La BTS es una estación base de radio responsable de la comunicación inalámbrica con los MSs y están gestionadas por la BSC.
- **El subsistema de conmutación y de red (NSS):** se trata del núcleo de la red, formado por los nodos del centro de conmutación móvil (MSC), el registro de localización doméstico (HLR) y el registro de localización de visitantes (VLR). El MSC es el responsable de la administración de los MSs, el establecimiento de llamada, el direccionamiento de la llamada y la gestión de la movilidad.

Además de estos tres subsistemas, GSM-R incluye servidores responsables de servicios del ferrocarril, como la llamada de emergencia, y nodos responsables de las tareas de operación y mantenimiento. La arquitectura básica de se GSM-R se presenta a continuación [33]:

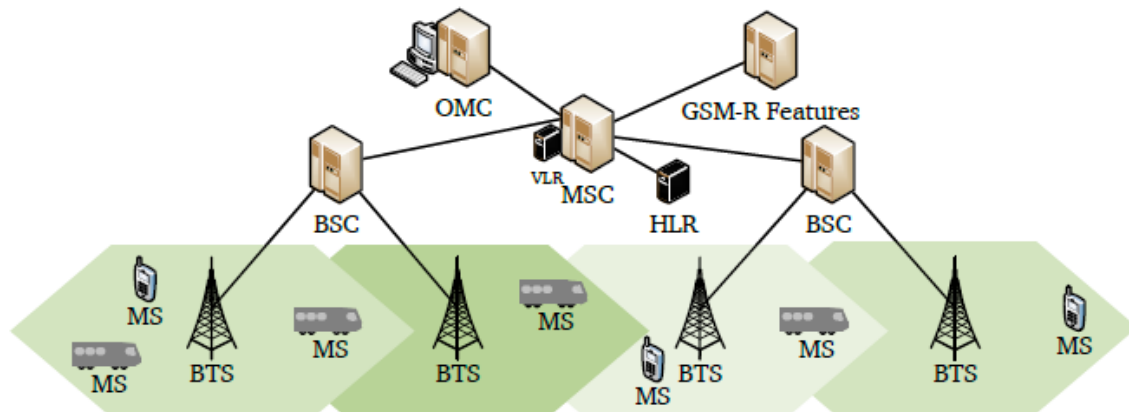


Figura 8. Arquitectura de la red GSM-R [33]

Debido al incremento de redes públicas, el uso del GSM-R se está viendo entorpecido al producirse ciertas limitaciones como la interferencia con otras redes públicas que también buscan tener una buena cobertura a lo largo de las vías, llegando a producir deterioro en las comunicaciones de voz y datos, así como pérdidas de red en cientos de metros de la vía. Teóricamente esta interferencia se puede eliminar si los operadores públicos no utilizan bandas de frecuencias adyacentes a las de GSM-R, pero en la práctica no se lleva a cabo correctamente. El ancho de banda de los canales (200 kHz) es suficiente para las comunicaciones de voz, que no ocupan recursos de manera continua, pero para la siguiente generación de trenes será insuficiente ya que necesitarán comunicaciones de datos continuas por lo que se necesitará ampliar los recursos del espectro. En relación con la demanda de aplicaciones basadas en datos, en GSM-R las comunicaciones de este tipo se realizan por conmutación de circuitos que ofrece un ancho de banda constante a pesar de la carga actual de tráfico, lo que hace que la red de datos sea ineficiente por reservar de más los recursos y utilizarlos por debajo de sus capacidades. Para establecer la conexión de datos es necesario establecer una llamada dedicada de conmutación de circuitos con cada tren, de forma que cada celda puede acomodar de manera teórica hasta 23 trenes, pero en la práctica son menos 20 [33], lo que supone una capacidad insuficiente en los sistemas GSM-R, sobre todo en áreas con grandes densidades de tráfico de trenes. Otra característica que afecta a la siguiente generación de comunicaciones en este escenario es la imposibilidad de ofrecer servicios avanzados debido a que su velocidad máxima por conexión es de 9,6 kbps, suficiente para aplicaciones con baja demanda, pero produce retardos de unos 400 ms en la transmisión de mensajes, imposibilitando la utilización de aplicaciones en tiempo real [27] [32].

Las comunicaciones en el ámbito ferroviario avanzan de manera más lenta en comparación con los avances tecnológicos que se están llevando a cabo hoy en día y la demanda de comunicaciones en los trenes está continuamente aumentando. GSM-R es un sistema de comunicaciones de segunda generación, implantado para mejorar la calidad de los servicios de los sistemas analógicos anteriores, cuyas características son inferiores a las redes 4G utilizadas actualmente. Una red de comunicación de ferrocarriles modernos requiere de un buen soporte para la transmisión de datos, por lo que está previsto que la siguiente generación de comunicaciones del ferrocarril será necesaria en el año 2025 con 5 años de migración, por lo que en el año 2030 el GSM-R quedará obsoleto [35].

4.2. TETRA

La primera versión del estándar profesional TETRA ('Radio Troncal Terrestre') para radiocomunicaciones móviles terrestres se publicó en el año 1995 por el ETSI ('Instituto de Estándares de Telecomunicaciones') y fue diseñado para el uso de agencias gubernamentales, servicios de emergencias, redes públicas seguras, transporte ferroviario, servicios de transporte y el ejército. El sistema TETRA fue rechazado para el uso de los trenes europeos en los años 90, sin embargo, se convirtió en la tecnología de los ferrocarriles en Kazajistán y Taiwán. Las principales razones de su elección sobre GSM-R fueron a su menor coste, la mayor capacidad y el mayor rango de las celdas, aunque no suponen mejoras significantes respecto a GSM-R [33].

Este sistema trabaja en la banda de frecuencias de 400 MHz con acceso TDMA y modulación $\pi/4$ DQPSK con cuatro canales por portadora y un ancho de banda de canal de 25 kHz [29].

Se utiliza para comunicaciones directas en situaciones donde la cobertura de las redes no está disponible como en entornos bajo tierra o con mala cobertura. Ofrece servicios de voz, así como ciertos tipos de servicios de datos para comunicaciones punto a punto y punto a multipunto [29].

Requisitos	Valores		Calidad	
Retraso de establecimiento de conexión de llamadas originadas en el móvil	< 1s		100%	
Ratio de error en el establecimiento de conexión	0		100%	
Ratio de pérdidas en la conexión	< 10^{-4} /h		100%	
Máximo retraso en la transmisión punto a punto (de un bloque de datos de 30 bytes)	$\leq 0,5$ s		100%	
Período de interferencia en la transmisión	< 0,8s	< 1s	95%	100%
Período libre de errores	> 20s		100%	
Retraso en el registro de la red	< 15s		100%	
Tiempo de establecimiento de llamada	< 1s		100%	
Tiempo de establecimiento de llamada de emergencia	$\leq 0,5$ s		100%	

Tabla 20. Valores de calidad de servicio obtenidos de TETRA [36] [28]

En los entornos ferroviarios se usa para la autenticación de terminales a través de la infraestructura, para el canal de control mediante mensajes de estado y servicios de datos cortos, y para la protección contra escuchas secretas, cifrado de la interferencia del aire y cifrado punto a punto. Su principal aplicación es el servicio de llamada de grupo ya que este sistema funciona a velocidades de 300 km/h aplicando corrección de errores de transmisión y compensando los desvanecimientos por sombra.

Características	TETRA
Frecuencia	400 MHz
Ancho de banda de canal	25 kHz
Modulación	$\pi/4$ DQPSK
Acceso múltiple	TDMA
Velocidad máxima de transmisión	5-10 kbps
Velocidad de datos	28,8 kbps
Movilidad	300 km/h
Rango de la celda	10-25 km

Tabla 21. Características de los sistemas TETRA

El sistema TETRA se está quedando obsoleto como el GSM-R, se sigue utilizando a día de hoy debido a su alto grado seguridad y eficiencia en escenarios complejos, aunque ofrece velocidades de pico de 5-10 kbps muy inferiores a las brindadas por los sistemas LTE. [37]

4.3. LONG TERM EVOLUTION (LTE)

La primera especificación de LTE apareció en el año 2008 con la *Release 8* ('Versión 8') del 3GPP ('Proyecto de Asociación para la Tercera Generación') como mejora de la red UMTS ('Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles'), sucesora de GPRS ('Servicio General de Paquetes vía Radio') que es la evolución de las redes GSM.

Utiliza OFDMA ('Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales') en el enlace descendente y SC-FDMA en el enlace ascendente con modulaciones y esquemas de código elegidos de forma dinámica en función de las condiciones y de la demanda de tráfico, permitiendo a la red un balance entre velocidad y fiabilidad en la transmisión. Gracias al uso de OFDMA, modulaciones hasta 64QAM y sistemas MIMO se consigue una eficiencia espectral mucho mayor que en cualquier otro sistema de comunicación ya implantado. Trabaja en las bandas de frecuencia de 800 MHz, 1,8 GHz y 2,6 GHz, consiguiendo de esta forma anchos de banda de hasta 20 MHz, con multiplexación espacial en el enlace descendente logrando velocidades teóricas de 300 Mbps y en el enlace ascendente de 75 Mbps. [38]

Las comunicaciones LTE se basan completamente en IP ('Protocolo de Internet'), proporcionando comunicaciones de voz y datos mediante conmutación de paquetes con una arquitectura de red nueva, eliminando el nodo de control de las generaciones anteriores. Las redes de acceso son conexiones de estaciones base, conocidas como eNBs ('Nodos B evolucionados'), que están interconectadas entre sí y con el núcleo de la red. De esta manera se elimina el control centralizado distribuyendo la inteligencia entre las estaciones base para acelerar el establecimiento de las comunicaciones y reducir el traspaso [30].

En cuanto a calidad, LTE ofrece mecanismos de diferenciación de tráfico, protección y priorización sobre las redes radio y troncales. Incluye los mecanismos estandarizados para funcionar con las tecnologías existentes como la re-selección de celda, el traspaso y la conexión permitiendo a los terminales móviles cambiarse de manera rápida de una red a otra.

Como evolución de los sistemas LTE, en 2011 se introduce la especificación LTE-A con la *Release 10*. Con este estándar se pretende aumentar las capacidades de las redes LTE de manera eficiente, incrementando las velocidades de bajada hasta 3 Gbps y de subida a 1,5 Gbps, mejorando la eficiencia espectral con 30 bps/Hz (en comparación con 16 bps/Hz de LTE), ampliando el número de usuarios conectados simultáneamente e incluyendo nuevas funcionalidades como la agregación de portadora logrando combinar hasta 5 canales para obtener anchos de banda contiguos de hasta 100 MHz, la mejora de los sistemas MIMO con un orden mayor de antenas en la configuración e introduciendo nodos repetidores para soportar el despliegue de redes heterogéneas y mejorar la coordinación de interferencia entre celdas [31].

En la *Release 11* se producen mejoras en el sistema, en 2015 con la *Release 12* y su prioridad en el estudio de LTE para servicios de seguridad y emergencia, con especificaciones técnicas para aplicaciones de misión crítica crea una gran expectativa en esta tecnología para su investigación de

su uso en el entorno ferroviario. En 2016 finaliza la *Release 13* con un gran interés para el ámbito del ferrocarril ya que establece las especificaciones para cubrir los servicios de misión crítica, en particular los sistemas *Push-to-Talk* ('Pulsar Para Hablar'). En junio de 2017 se especifica la *Release 14* que mejora los servicios de misión crítica y se centra en las comunicaciones LTE V2X ('Vehículo a Cualquier cosa') entre otros temas. [31]

Para los sistemas ferroviarios que todavía no han migrado a los sistemas inalámbricos digitales, la tecnología LTE puede ser una buena opción para mejorar y hacer más eficientes las comunicaciones en los trenes ya que con las últimas versiones de LTE se amplía el escenario de trenes de alta velocidad alcanzando velocidades de 350 km/h hasta 500 km/h.

LTE en entornos ferroviarios se basa en los sistemas LTE, pero difiere de ellos en cuanto a que su configuración se centra más en la fiabilidad que en la capacidad. Trabaja en las bandas de frecuencia de 450 MHz, 800 MHz, 1,4 GHz y 1,8 GHz, logrando anchos de banda de 20 MHz con modulación QPSK o 16QAM. Consigue velocidades en el enlace descendente de 50 Mbps y en el ascendente de 10 Mbps, con eficiencia espectral de pico de 2,55 bps/Hz y pudiendo soportar velocidades hasta 500 km/h.

En la Tabla 22 se presentan las diferencias entre las principales características del sistema LTE y el utilizado en entornos ferroviarios:

Características	LTE	LTE en entornos ferroviarios
Frecuencia	800 MHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz	450 MHz, 800 MHz, 1,4 GHz, 1,8 GHz
Ancho de banda de canal	1,4-20 MHz	1,4-20 MHz
Modulación	QPSK/MQAM (hasta 64QAM)	QPSK/16QAM
Acceso múltiple	OFDMA	OFDMA/SCFDMA
Velocidad máxima de transmisión	DL: 300 Mbps UL: 75 Mbps	DL: 50 Mbps UL: 10 Mbps
Movilidad	500 km/h	500 km/h
Rango de la celda	1-5 km	4-12 km

Tabla 22. Comparación de las características de LTE y LTE en entornos ferroviarios

Existen ciertos desafíos técnicos de LTE para soportar las funcionalidades de los trenes para los cuales se proporcionan distintas salidas [39]:

- **Proporcionar servicios de voz:** LTE es la primera red de comunicación móvil que utiliza completamente conmutación de paquetes, es decir, no incluye la parte de la red de conmutación de circuitos de las generaciones anteriores. Las soluciones se basan en el uso de IMS ('Subsistemas Multimedia IP'), VoLGA ('Voz sobre LTE a través de Acceso Genérico') utilizando los accesos 2G/3G (Segunda/Tercera Generación de telefonía móvil) y entregando los servicios a través de LTE, y CSFB ('Recuperación de Circuitos Conmutados') utilizando las redes de conmutación de circuitos de GSM-R. CSFB es una solución temporal que fuerza al usuario a cambiar a otra red (GSM o UMTS) cuando se produce una llamada entrante o saliente, teniendo que apagar la radio LTE y por lo tanto, traspasar todos los servicios a una de las otras redes implantadas. Por estos motivos se tienen tiempos de establecimiento de llamada largos y se produce una discontinuidad de las comunicaciones de datos durante la llamada de voz. En los entornos ferroviarios el establecimiento de llamada rápido es una de las prioridades y la señalización ETCS mediante datos debe de ser manejada entre redes en todo momento haya llamada de voz o no. Estos traspasos entre redes incrementan los retardos de la transmisión de ETCS y CSFB requiere el mantenimiento de alguna de las redes implantadas anteriormente para ofrecer sólo los servicios de voz, por lo tanto, no puede tratarse como una solución a largo plazo en entornos ferroviarios. La solución que está ganando terreno es la voz puramente LTE que se basa en IMS llamada VoLTE ('Voz sobre LTE') y transmite voz por IP. Se debe a que VoLTE no necesita de otras redes ya implantadas ni de un núcleo de red de conmutación de circuitos de generaciones anteriores, por lo que no interrumpe la comunicación de datos sobre LTE. Se basa en estándares abiertos bien definidos ofreciendo soluciones de inter-operabilidad con

generaciones anteriores de conmutación de circuitos y consta de características suplementarias como la llamada en espera, la llamada de respuesta, el *roaming* y la “negociación” de calidad del servicio.

- **Traspaso:** el estándar LTE soporta mecanismos de traspaso para reducir la complejidad de la arquitectura de la red. El *Hard-Handover* (‘traspaso fuerte’, traspaso sin continuidad), utilizado en GSM, utiliza un solo canal para cambiar al usuario de una estación base a otra, desconectándose de la primera para realizar una nueva conexión con la segunda, por lo que se puede producir pérdida de paquetes en ese tiempo (~ms) de desconexión. Este mecanismo en LTE debe minimizar la pérdida de paquetes o eliminarla completamente con una conexión y tiempo de re-asociación rápidos para cumplir los requisitos de calidad, fiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad en el ferrocarril. Para llevar esto a cabo existen dos posibilidades, la primera es implementar un *Soft-Handover* (‘traspaso suave’, traspaso con continuidad) en el que el terminal se encuentra conectado por un canal a la estación base origen y por otro, de manera simultánea, a la estación base destino, realizando la transmisión en paralelo por dos canales sin interrumpir el enlace, por lo que se necesita un mayor ancho de banda y eficiencia, pero reduce la pérdida de paquetes; la segunda se centra en optimizar los mecanismos de *Hard-Handover* de LTE minimizando la pérdida de paquetes al reducir los tiempos de traspaso.
- **Calidad de los mecanismos de los servicios y el control de acceso en las redes:** en los entornos ferroviarios es necesario asegurar el envío de paquetes de voz y datos junto con unos requisitos garantizados de retardos, de tasa de errores de datos, de tiempo de interrupción de traspaso, de establecimiento de llamada y de velocidad. En LTE existen ciertos mecanismos de planificación en tiempo real para la asignación de recursos de acuerdo a las prioridades de los usuarios y las categorías de los servicios que aseguran los requisitos de calidad, fiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad en los trenes.
- **Funcionamiento de la red en entornos de alta velocidad:** en este escenario existen diversos problemas que deben ser evaluados como el efecto Doppler, por el cual se puede romper la ortogonalidad entre las portadoras de OFDM produciendo ICI (‘Interferencia Entre Portadoras’), que incrementa la tasa de error. Se ha demostrado que el problema de ICI se puede minimizar utilizando técnicas MIMO o métodos de cancelación basados en una estimación mejorada del canal. También existe la posibilidad de que se produzca ISI (‘Interferencia Entre Símbolos’) en el caso de que el prefijo cíclico que precede al símbolo de OFDM sea más corto que la dispersión de retardo, se puede eliminar utilizando una longitud mayor del prefijo cíclico. Debido a la dispersión en frecuencia por efecto Doppler, las secuencias utilizadas para el preámbulo de acceso aleatorio pueden distorsionarse a velocidades por encima de los 200 km/h, aumentando la probabilidad de fallo en el acceso aleatorio. Este problema se puede minimizar mediante un método de restricción de desplazamiento cíclico que permite a la red soportar usuarios a velocidades mayores. La alta velocidad afecta en el recurso de planificación ya que se basa en la información de señalización de control y estas medidas de estimación de canal se pueden ver afectadas por la velocidad y el cambio de rápido del canal, produciéndose pérdidas en la ganancia de diversidad y empeorando los sistemas de planificación. En estos entornos también pueden aparecer fallos en el traspaso entre celdas producidos por las velocidades a las que se mueve el terminal entre una celda y otra (entre el eNodeB origen y el eNodeB destino). Según aumenta la velocidad, el tiempo disponible para el traspaso disminuye, y si el tiempo de procedimiento es demasiado lento, existe el riesgo de que el enlace falle.

La arquitectura de red de LTE en entornos ferroviarios difiere de las anteriores, como sucede con LTE público. El acceso radio se llama E-UTRAN (‘Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada’) y consiste en los Equipos de Usuario (UEs) y los eNodeBs, los UEs son los terminales, en este entorno, pueden tratarse de dispositivos o módulos de radio instalados en el tren, el eNodeB, como hemos comentado anteriormente, se trata de una estación base que provee de cobertura, gestionando los recursos radio y ordenando los paquetes [33].

La red troncal se llama EPC y consta de los siguientes nodos lógicos [33]:

- **Pasarela de servicio (S-GW):** responsable de la interconexión de la pasarela de las redes de paquetes de datos (P-GW) con el eNodeB.
- **Pasarela de las redes de paquetes de datos (P-GW):** es el nodo frontera entre la red LTE y una red exterior (como puede ser una red fija de comunicación ferroviaria). Es el nodo que provee de interfaz al Centro de Bloque por Radio de los trenes (RBC) que recibe y transmite de manera continua la información relacionada con la posición de cada tren.
- **Entidad de gestión de movilidad (MME):** encargada de toda la señalización de la red interna entre el eNodeB y el núcleo de la red. Se encarga de la autenticación, administración del servicio portador, gestión de movilidad, y la interconexión con otras redes radio.
- **Servidor del suscriptor doméstico (HSS):** es la base de datos de la información del usuario (suscriptor). Incluye los perfiles de usuario, que, por ejemplo, enumeran los servicios disponibles para un suscriptor en particular y las redes externas a las que puede acceder.
- **Función de política y reglas de cargas (PCRF):** maneja las políticas y reglas de la calidad del servicio como puede ser la vigilancia del establecimiento del servicio portador radio.

En la Figura 10 se muestra la arquitectura de la red descrita:

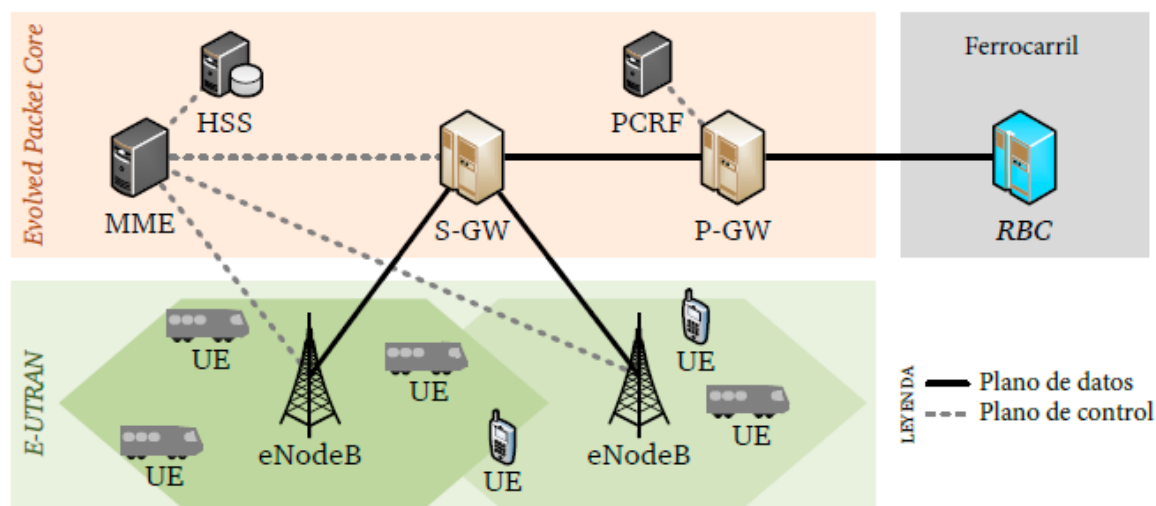


Figura 9. Arquitectura de la red LTE en entornos ferroviarios [33]

Como ocurre en LTE, la arquitectura de la red de VoLTE es distinta a la utilizada en los sistemas GSM-R. Tiene tres partes principales: E-UTRAN, EPC e IMS. Las dos primeras son elementos estándar de la arquitectura LTE, y la tercera, IMS, es la responsable del establecimiento y la administración de las llamadas. Los elementos centrales de IMS son las Funciones de Control de Sesión de Llamada (CSCFs) que se encargan del registro de usuario, el establecimiento de la sesión, la ruta de señalización y la gestión de la sesión. Se pueden dividir en cuatro elementos lógicos: el P-CSCF, responsable de la autorización de recursos, detección de sesiones de emergencia, compresión de señalización y seguridad de comunicación.

El S-CSCF ('CSCF de Servidor'), encargado del registro, autorización y enrutamiento de llamada del usuario. El I-CSCF ('CSCF de Interrogador'), utilizado como punto de contacto para las llamadas entrantes de dominios externos. Y, por último, el E-CSCF ('CSCF de Emergencia'), que direcciona las llamadas de emergencia al punto de respuesta de seguridad pública o de ferrocarril (RSAP) correcto [33].

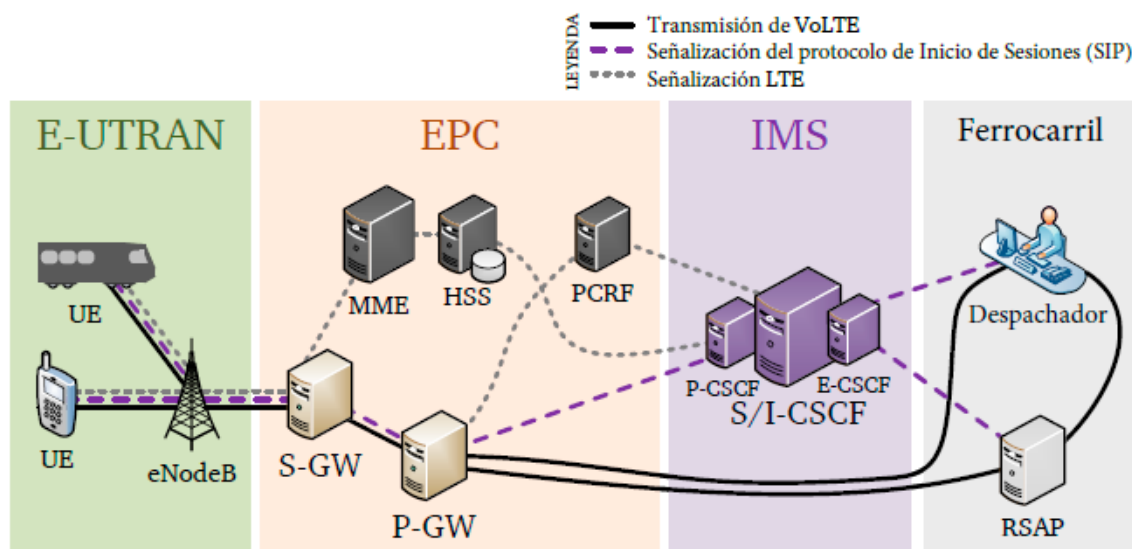


Figura 10. Arquitectura VoLTE en entornos ferroviarios [33]

En la Tabla 23 se muestran las características de la calidad de los servicios ofrecidos por las redes LTE:

Servicios	Retraso máximo de paquete	Ratio de error de paquete
Conversación de voz	100 ms	10^{-2}
Conversación de vídeo (<i>Streaming</i> en directo)	150 ms	10^{-3}
Juegos en tiempo real	50 ms	10^{-3}
Vídeo (<i>Streaming</i> almacenado)	300 ms	10^{-6}
Sistemas de voz <i>Push-to-Talk</i> de misión crítica en el plano de usuario (MCPTT)	75 ms	10^{-2}
Sistemas de voz <i>Push-to-Talk</i> en el plano de usuario (no misión crítica)	100 ms	10^{-2}
Señalización IMS	100 ms	10^{-6}
Vídeo (<i>Streaming</i> almacenado) basado en TCP (ej. www, e-mail, chat, compartir archivos por p2p, etc)	300 ms	10^{-6}
Voz		
Vídeo (<i>Streaming</i> almacenado)	100 ms	10^{-3}
Juegos interactivos		
Señalización sensible al retraso de misión crítica (ej. Señalización MCPTT)	60 ms	10^{-6}
Datos de misión crítica	200 ms	10^{-6}

Tabla 23. Características de calidad de los servicios LTE [40]

Una de las principales ventajas para optar por LTE para la siguiente generación de comunicaciones ferroviarias se basa en que LTE es la última familia de estándares de comunicaciones móviles, por lo que hay mucho menor riesgo de que se quede obsoleto que otros estándares anteriores como GPRS, UMTS o HSPA ('Acceso de Paquetes de Alta Velocidad'), motivo por el que no se han planteado en este estudio.

Aunque todavía no se ha aplicado a gran escala, los sistemas de comunicaciones LTE ya se están utilizando en países como Japón y Corea del Sur, por ejemplo, para los Juegos Olímpicos de Invierno de Pyongyang de 2018 [41] y en el metro de Busan desde 2016 [41].

4.4. 5G

En 2016 se inició la *Release 14* de 3GPP, finalizada en junio de 2017, en la que se llevaron a cabo más de 30 estudios, sobre todo centrados en la mejora de los sistemas LTE como hemos comentado en el apartado 4.3., entre los que se encuentran el estudio de requisitos a nivel de red de acceso, de diseño y de algunas frecuencias por encima de 6 GHz para 5G. Actualmente se encuentran paralelamente bajo desarrollo la *Release 15*, iniciada en la primera mitad de 2017 y la *Release 16*, comenzada en septiembre de 2017, que se centran en la estandarización de los sistemas 5G. La *Release 15* es la primera fase de 5G que se centra en los servicios móviles de banda ancha (espectro con/sin licencia, FDD y TDD, banda baja media y alta, hasta 300 MHz, y la compatibilidad con LTE) y en paralelo con el estudio de bandas milimétricas, el Internet de las Cosas, servicios de misión crítica y operaciones autónomas (sin apoyo LTE). La segunda fase de 5G es la *Release 16*, esta se centra en el resto de componentes 5G (ancho de banda para operaciones autónomas, servicios de misión crítica, rangos altos de frecuencia y bandas milimétricas, y el Internet de las Cosas en áreas amplias) y la entrega final a la ITU ('Unión Internacional de Telecomunicaciones') para IMT-2020. [38]

5G trabajará en distintas bandas de frecuencia (el espectro de frecuencias se ha explicado en el capítulo 3): banda baja (por debajo de 1GHz, bandas UHF, banda media (entre 1 GHz y 6 GHz) y banda alta (a partir de 28 GHz). Logrando anchos de banda de hasta 1GHz en la banda alta, con distintos tipos de modulación según sea necesario, utilizando $\pi/2$ BPSK, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM o 256QAM [42]. Consigue velocidades teóricas en el enlace descendente de hasta 20 Gbps y en el ascendente de 10 Gbps [7], con eficiencia espectral de pico de 30 bps/Hz en el enlace descendente y 15 bps/Hz en el ascendente [7], pudiendo soportar velocidades hasta 500 km/h [7] y la conexión masiva de dispositivos, teóricamente, a su inicio de 1 millón de dispositivos [7] y cuando esté afianzado de hasta 100 billones [3].

Como ocurre en LTE, las comunicaciones 5G se basan completamente en IP, ofreciendo servicios de voz y datos mediante conmutación de paquetes, pero en este caso, el núcleo de la red (EPC) 5G está basado en la nube, por lo que, al virtualizar la red, es posible aplicar las tecnologías de SDN y NFV (explicadas en el apartado 2.1.) haciendo la red más flexible en cuanto a servicios y funciones, y mejorar la coordinación entre las estaciones. [20]

La arquitectura de la red 5G utiliza las técnicas y tecnologías explicadas en el apartado 2.1., de forma que integra frecuencias bajas y altas mediante el concepto de celdas fantasma y los enlaces con dúplex flexible que juntan las operaciones de FDD y TDD para bandas de frecuencia altas y bajas. La densificación de la red utilizando celdas pequeñas con nodos de baja potencia es una solución prometedora para abarcar el aumento del tráfico, sobre todo en áreas con mucho tráfico. Por esta causa, aparece el concepto de arquitectura *Advanced C-RAN* ('RAN Centralizada Avanzada'), que adopta la arquitectura de la red centralizada con varias ramas de equipamiento radio remoto (RRE) y utiliza la agregación de portadora entre celdas grandes y pequeñas. Esta arquitectura gestiona todos los procesos de agregación de portadora y traspaso entre la Unidad de Banda Base (BBU) y el eNodeB, reduciendo drásticamente la cantidad de señalización enviada al núcleo de la red. El concepto de celda fantasma se basa en una arquitectura de red multinivel, separando el plano de control (C) y el de usuario (U) entre macroceldas y celdas pequeñas que utilizan bandas de frecuencia diferentes. Incluyendo de esta forma la mejora de la capacidad y despliegue sin impacto en la gestión de la movilidad de las celdas pequeñas y el despliegue sencillo de las celdas grandes. Con esta arquitectura las celdas pequeñas se encargan del tráfico de las sesiones de usuario (U) con velocidades altas y las macroceldas se encargan de la señalización del plano de control (C), enviando también información a los usuarios conectados a celdas pequeñas. Esta arquitectura hace que las celdas pequeñas sean prácticamente invisibles para el usuario que está conectado a ellas, de ahí a que se llamen celdas fantasma. La explotación de frecuencias altas hace posible la utilización de técnicas de MIMO masivo y distintas modulaciones en la red, como FBMC que se puede utilizar para priorizar la cobertura y soportar bandas de frecuencia más amplias y nuevos escenarios. También mejora las celdas en frecuencias bajas por el uso de NOMA, introducido en el dominio de la potencia y compartiéndola entre usuarios, beneficiándose todos los usuarios al ser organizados más veces y asignándoles mejor el ancho de banda que necesitan.

NOMA soporta un mayor número de conexiones simultáneas, permitiendo la conexión masiva de usuarios, y permite la multiplexación de usuario sin el conocimiento del transmisor de su estado actual, posibilitando servicios más robustos, incluso en escenarios de alta velocidad o redes móviles [43] [44].

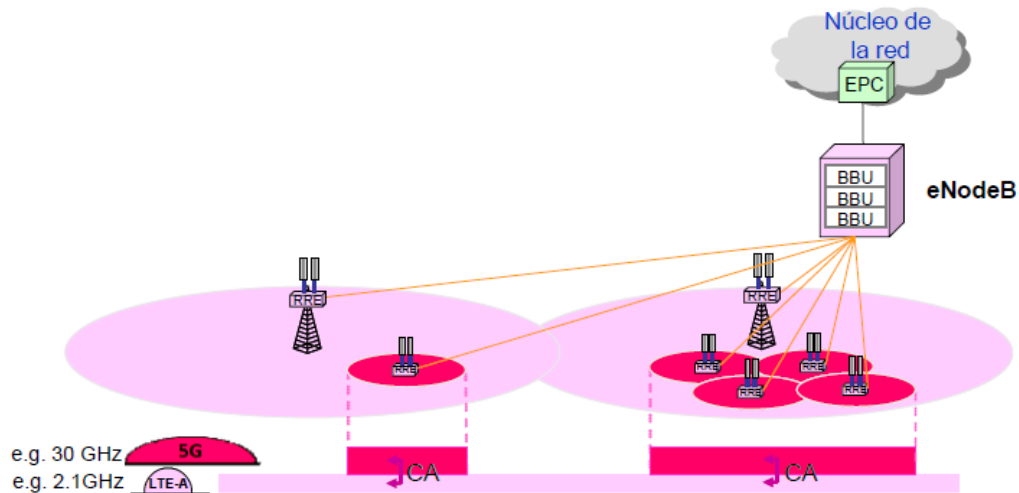


Figura 11. Arquitectura de red de 5G [2]

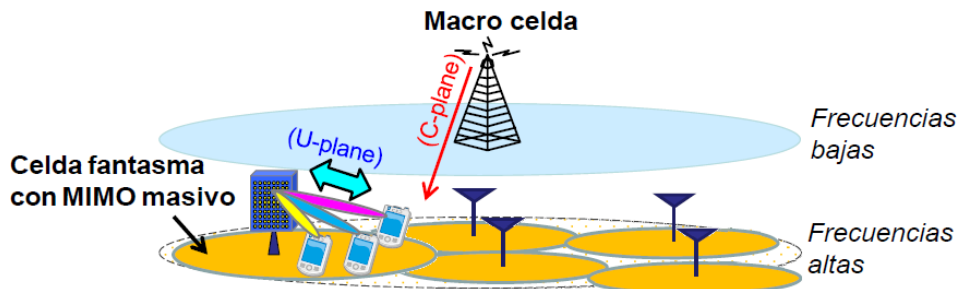


Figura 12. Celda fantasma y MIMO masivo en 5G [43]

Como se ve en la Figura 13, se espera que el 5G pueda coexistir junto a sistemas de comunicaciones anteriores como GSM o LTE, de esta forma aparece en concepto de NG-RAN ('Siguiete Generación de RAN'), en el que el nodo gNB provee al plano de usuario y al de control de la red de acceso 5G conexiones hasta los equipos de usuario y el nodo ng-eNB se las provee a los planos de las redes E-UTRA (LTE). Estos nodos están conectados entre sí por la interfaz Xn y con el núcleo de la red 5G por la interfaz NG, más concretamente conectados al AMF ('Acceso y Gestión de Movilidad') que es el plano de control, y al UPF ('Función del Plano de Usuario') que es el plano del usuario [45].

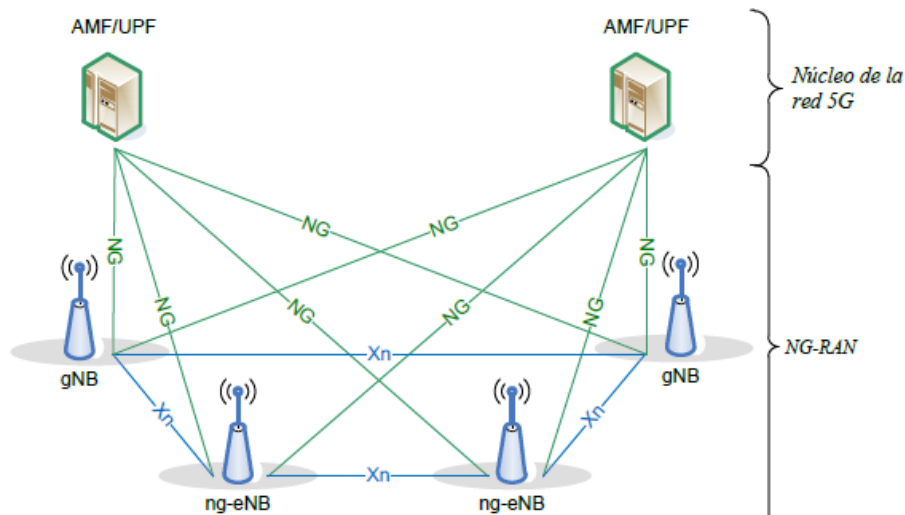


Figura 13. Arquitectura de NG-RAN para la coexistencia de LTE y 5G [45]

Aunque todavía no se ha especificado las frecuencias que se utilizarán en entornos ferroviarios, el 3GPP propone la utilización de la banda de 4GHz para las macroceldas de la red y la banda de 30GHz o de 70GHz para las celdas pequeñas de la red, obteniendo de esta forma anchos de banda de hasta 200 MHz en las macroceldas y 1GHz en las celdas pequeñas. Se podrán utilizar las mismas modulaciones que en el caso 5G público: $\pi/2$ BPSK, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM o 256QAM [42], consiguiendo, a velocidades de hasta 500 km/h, en el enlace descendente y en el ascendente velocidades mínimas de usuario (para alcanzar la calidad suficiente) de 50 Mbps y 25 Mbps y capacidades teóricas de 15 Gbps/tren y 7,5 Gbps/tren (hasta 1000 usuarios/tren), respectivamente [46]. [43]

El estudio de la arquitectura de la red de 5G en entornos ferroviarios se finalizará en septiembre de 2018 por parte del 3GPP y la UIC con el proyecto FRMCS ('Sistema de Comunicaciones Móviles del Futuro Ferroviario'), pero ya ha comenzado su estandarización, aunque no sea definitiva, siguiendo el estándar de la red de acceso de 5G. En este entorno, las antenas se colocan a lo largo de la vía a ambos lados de la misma, siendo antenas muy directivas de manera que sus lóbulos no tengan mucho ancho de haz y direccionando los rayos para cubrir áreas largas, sobre todo en bandas altas. Se pretende tener cobertura continua a lo largo de toda la vía en trenes de alta velocidad para tener una experiencia de pasajeros consistente y comunicaciones críticas fiables. El 3GPP propone dos tipos de despliegue para entornos ferroviarios con velocidades máximas de 500 km/h, uno con macroceldas en la banda de 4 GHz y otro con nodos repetidores a 4GHz o con celdas pequeñas a 30 GHz o 70 GHz [15]. En el despliegue sin nodos repetidores en la banda de 4GHz cada RRH ('Equipo Radio Remoto') tiene 2 puntos de transmisión y recepción, la distancia entre un RRH y la vía es de 100m y entre los RRH de 1732m como se muestra en la Figura 15. Para el despliegue con nodos repetidores, a 4GHz las condiciones son como en el caso anterior, para celdas pequeñas a 30 GHz cada BBU tiene conectados 3 RRHs con un punto de transmisión y recepción por RRH, la distancia de un RRH a la vía es de 5m, entre BBUs de 1732m y entre RRHs de 580m, 580m y 572m como se muestra en la Figura 16. Los UEs de los pasajeros se encuentran en el interior de los vagones, por lo que, si la antena del nodo de repetición para las comunicaciones con el eNB está situada en lo alto de un vagón, puede distribuir las comunicaciones con los usuarios a lo largo de todos los vagones [15].

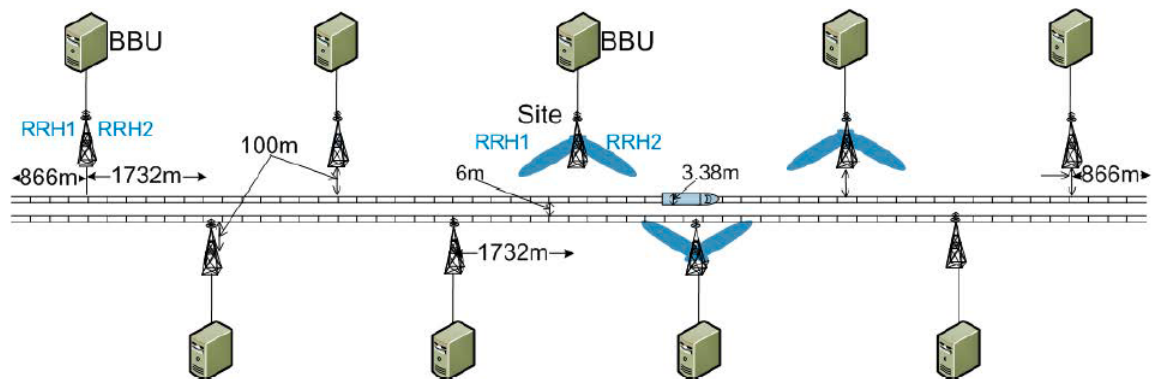


Figura 14. Despliegue de la red sin nodos repetidores a 4GHz [15]

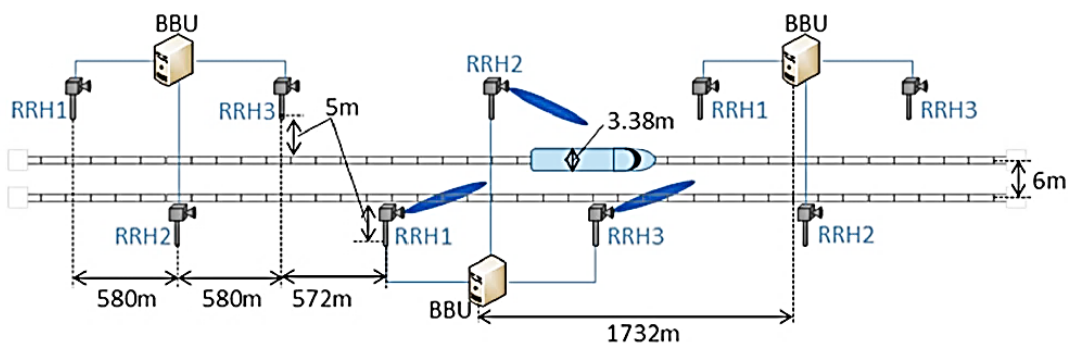


Figura 15. Despliegue de la red con nodos repetidores a 30 GHz [15]

Gracias al 5G y a las nuevas técnicas de SDN y NFV, se pueden hacer particiones de la red creando redes lógicas separadas e independientes en las que cada partición está hecha a medida para un caso de comunicación específico. De esta forma se puede crear una partición para las comunicaciones de banda ancha móvil que provee de servicios de *streaming* de vídeos de alta definición o de acceso a Internet de alta velocidad para los pasajeros. Gracias a las capacidades de *edge computing* (método de optimización de los sistemas de computación en la nube que hace que el procesamiento de datos se lleve a cabo en el borde de la red, sin necesidad de llevarlos a la nube) basados en NFV, los servidores locales desplegados en el borde de la nube como las BBUs o las estaciones repetidoras instaladas en el tren pueden ofrecer descarga de datos y una reducción de la latencia. La partición para las comunicaciones de misión crítica provee de servicios como el envío de mensajes de control, vigilancia y relacionados con la seguridad. En esta partición, la mayoría de las funciones del núcleo de red serán procesadas en el borde de la nube para minimizar la latencia. Es necesario crear una partición para la configuración de calidad del servicio o fiabilidad de la red ya que por la misma vía circulan distintos tipos de trenes como los de carga, de pasajeros y de mantenimiento. La partición para las comunicaciones tipo máquina se puede utilizar para los sensores colocados a lo largo de la vía para medir y monitorizar el estado de la misma. Las particiones que soportan los UEs dentro del tren tienen unos requisitos muy exigentes debido a la movilidad, especialmente durante los trasposos. También es necesaria una partición para la gestión de los trasposos con mucha potencia debido a la movilidad y a la gestión de los recursos. Sin embargo, las funciones del núcleo de la red se pueden llevar al núcleo de la nube centralizado para reducir los costes, y las funciones de gestión y movilidad se pueden omitir de las particiones [32] [47].

La partición para las comunicaciones de misión crítica requiere de una conectividad consistente y diseños de celdas configurados de manera que se reduzca la interferencia entre celdas. Para reducirla, se podrían utilizar distintas frecuencias centrales en celdas adyacentes, de forma que las señales transmitidas por el RRH en una celda no se vean en la adyacente, eliminando la interferencia como se muestra en la Figura 17 [32] [47].

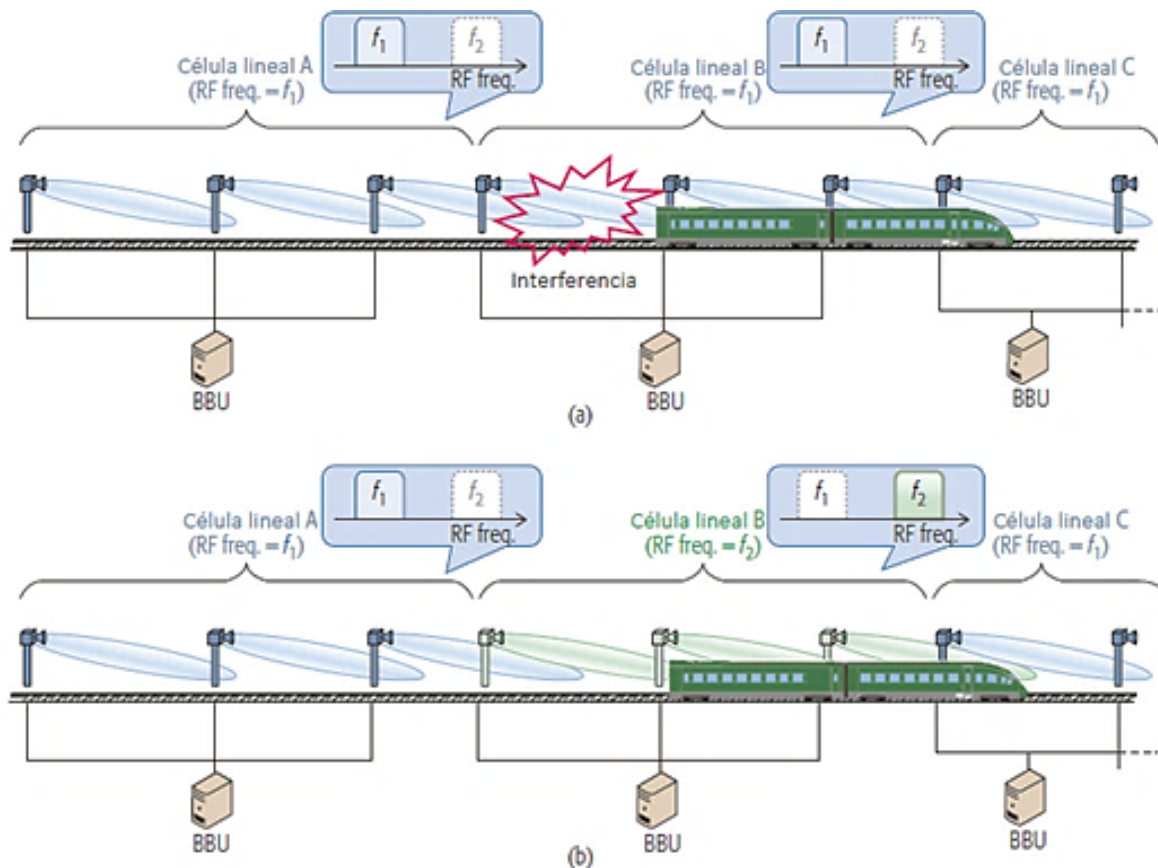


Figura 16. a) Reutilización de una frecuencia para 3 celdas b) Reutilización de dos frecuencias para 3 celdas [47]

Gracias al uso de redes de dispositivos inteligentes conectados a aplicaciones en la nube se pueden mejorar los sistemas de comunicación y de control. Como se ha explicado en el apartado 2.3.1.2., en un futuro habrá entornos con comunicaciones tipo máquina masivas, por lo que el 5G estará preparado para abordar las comunicaciones M2M, mejorando la eficiencia de los entornos ferroviarios con la utilización de sensores para automatizar tareas y enviar datos de análisis y de monitorización en tiempo real. Gracias a las nuevas capacidades y tecnologías de la red 5G, como la posibilidad de despliegue de redes de sensores inalámbricos (WSN), se podrán llevar a cabo los siguientes servicios (además de los disponibles en sistemas de comunicaciones anteriores) [31]:

- **Mantenimiento predictivo:** las decisiones de mantenimiento sobre elementos críticos de la infraestructura se pueden mejorar utilizando la localización precisa del tren, su velocidad, peso, datos de los sensores de vibración, informes sobre el tiempo, etc. pueden optimizar el proceso de toma de decisiones y ayudar a crear un *software* de planificación de la línea más sofisticado. Los algoritmos de control predictivo (MPC) se han creado para monitorizar acciones relacionadas con ciertos problemas para anticipar eventos, como puede ocurrir con el desgaste de las ruedas. Con el mantenimiento predictivo se puede mejorar la eficiencia del tráfico de la vía y reducir gastos gracias a la simplificación de los procesos y la mejor toma de decisiones gracias al análisis de los datos obtenidos por los sensores. Debido a la gran cantidad de datos que se obtendrá, son necesarias comunicaciones inalámbricas tren-tierra de gran capacidad.
- **Monitorización avanzada de problemas:** se pueden utilizar sensores para monitorizar equipamiento con el objetivo de generar alertas sobre la necesidad de atención en elementos críticos del tren como pueden ser el control de las puertas, los equipos de comunicaciones de emergencia, los frenos, etc. Para ello se requiere un tiempo de sincronización preciso con resolución de microsegundos.
- **Sistemas de videovigilancia:** estos sistemas son capaces de mostrar imágenes o vídeos de alta resolución del tren, de los vagones o de la estación. Las cámaras del CCTV inteligentes no sólo proveerán de grabaciones de eventos en caso de un incidente, podrán enviar alarmas en tiempo real de la ocurrencia de problemas potenciales, permitiendo respuestas tempranas para intervenir reduciendo los cortes del servicio.
- **Sistema de información a los pasajeros:** se trata de una herramienta operativa electrónica que ofrece información acústica y en forma de vídeo a los pasajeros durante el viaje, de manera automática o programada manualmente. Incluye información en tiempo real de la ruta y de las paradas, vídeos de alta calidad para entretenimiento o trabajo, videoconferencias y soluciones de conectividad online. La información de la posición actual de los trenes se transfiere al servidor principal donde se calculan los datos de las siguientes paradas. Se puede planear de manera predictiva lo que sucederá con los siguientes trenes incluyendo el historial de datos de lo que ha sucedido en los viajes anteriores.
- **Sistema de información de mercancía:** ofrece soluciones de gestión para la capacidad y la carga, organizando desde la reserva hasta la planificación del vagón. Ayuda a los trabajadores a tomar decisiones de organización e infraestructura basadas en datos robustos, fiables y consistentes. Se pueden monitorizar los rodamientos para controlar su estado mediante acelerómetros, sin embargo, la monitorización dentro de un tren de mercancías no es útil ya que los vagones no son atendidos y no tienen suministro constante de energía.
- **Sistemas autónomos:** existen dos tipos: semiautomáticos, relacionados con operaciones como los sistemas de señalización y de frenado, y completamente autónomos, estos utilizan técnicas de inteligencia artificial como algoritmos genéticos y lógica difusa.
- **Certeza de seguridad y sistemas de señalización:** el sistema posicionamiento a bordo es necesario para localizar todos los trenes y evitar colisiones, realizar operaciones seguras cuando dos trenes se encuentran cerca y optimizar el uso de los mismos. La medida y el control de la velocidad también son necesarios para garantizar la seguridad. La utilización de sensores y la automatización pueden ofrecer ventajas en los sistemas de señalización, ajustando remotamente

la velocidad y el frenado del tren, en el control de los pasos a nivel, evitando atropellos y problemas mediante el uso de cámaras y sensores, en los trabajos de cruce de trenes, que junto con el sistema de señalización pueden gestionar los semáforos y las señales para evitar colisiones o avisar de escenarios no seguros, y en el envío de información de texto, datos, voz, imagen y vídeo, que se encarga de despachar a los trabajadores de la información obtenida por los sensores y/o cámaras.

Los sensores utilizan los protocolos mostrados en la Tabla 24 para comunicarse y organizarse a sí mismos. Se comparan las distintas tecnologías que se pueden utilizar para la WSN mostrando en color verde aquellas características que cumplen completamente con los requisitos ferroviarios, en amarillo las que los cumplen parcialmente y en rojo las que no los cumplen [31]:

Tecnologías inalámbricas	Robustez	Funcionamiento en tiempo real	Rango	Throughput del enlace	Escalabilidad de la red	Conocimiento de potencia
IEEE 802.11						
IEEE 802.15.4						
Zigbee						
Zigbee Pro						
IEEE 802.15.1						
Bluetooth						
WirelessHART						
ISA 100.11a						
WISA						

Tabla 24. Comparativa de las distintas tecnologías para WSN en entornos ferroviarios [31]

Las características de calidad de los servicios 5G son las siguientes:

Servicios	Volumen máximo de datos	Retraso máximo de paquete	Ratio de error de paquete
Control remoto	160 B	5 ms	10^{-5}
Sistemas de transporte inteligente	320 B	10 ms	10^{-5}
Automatización de procesos discretos	255 B	10 ms	10^{-4}
	640 B	20 ms	10^{-5}
	1358 B	10 ms	10^{-4}
Conversación de voz	N/A	100 ms	10^{-2}
Conversación de vídeo (<i>Streaming</i> en directo)	N/A	150 ms	10^{-3}
Mensajes V2X, Monitorización de procesos automatizados, Juegos en tiempo real y Distribución de electricidad (voltaje medio)	N/A	50 ms	10^{-3}
Vídeo (<i>Streaming</i> almacenado)	N/A	300 ms	10^{-6}
Sistemas de voz <i>Push-to-Talk</i> de misión crítica en el plano de usuario (ej. MCPTT)	N/A	75 ms	10^{-2}
Sistemas de voz <i>Push-to-Talk</i> en el plano de usuario (no misión crítica)	N/A	100 ms	10^{-2}
Mensajes V2X	N/A	50 ms	10^{-2}
Señalización IMS	N/A	100 ms	10^{-6}
Vídeo (<i>Streaming</i> almacenado) basado en TCP (ej. www, e-mail, chat, compartir archivos por p2p, etc)	N/A	300 ms	10^{-6}
Voz, Vídeo (<i>Streaming</i> almacenado) y Juegos interactivos	N/A	100 ms	10^{-3}
Señalización sensible al retraso de misión crítica (ej. Señalización MCPTT)	N/A	60 ms	10^{-6}
Datos de misión crítica	N/A	200 ms	10^{-6}
Aplicaciones de realidad aumentada de baja latencia y eMBB	N/A	10 ms	10^{-6}

Tabla 25. Características de calidad de los servicios 5G [48]

5G también proveerá de servicios a través de comunicaciones satélite existiendo varias posibilidades de redes no terrestres (NTN) [46] [49] [50]:



Figura 17. NTN con NG-RAN y repetidor satélite entre el gNB y los UEs terrestres para ofrecer servicios a los usuarios [50]



Figura 18. NTN con NG-RAN con gNB en el satélite para ofrecer servicios a los UEs [50]



Figura 19. NTN con NG-RAN y un nodo repetidor para ofrecer los servicios a los UEs con un repetidor satélite entre el gNB y el nodo repetidor [50]



Figura 20. NTN con NG-RAN con gNB en el satélite y un nodo repetidor para ofrecer servicios a los UEs [50]

Para la Región 1 en la que se encuentra España existen distintas bandas de frecuencia especificadas por la ITU en las que trabajan los satélites en función de sus características:

Tipo	Enlace descendente (espacio-Tierra)	Enlace ascendente (Tierra-espacio)
Banda Ka, satélite con GEO	17,3 – 20,2 GHz	27,5 – 30,0 GHz
Banda Ka, satélite no GEO	17,3 – 20,2 GHz	27,5 – 29,1 GHz 29,5 – 30,0 GHz
Banda S, satélite GEO o no GEO	2170 – 2200 MHz	1980 – 2010 MHz
Banda S, HAPS y FDD	2110 – 2170 MHz	1885 – 1980 MHz 2010 – 2025 MHz
Banda S, HAPS y TDD	2110 – 2170 MHz	2110 – 2170 MHz
Bandas Q y V, satélite GEO o no GEO (sujeto a la protección de los sistemas GEO)	37,5 – 42,5 GHz	42,5 – 43,5 GHz
	47,5 – 47,9 GHz	47,2 – 50,2 GHz
	48,2 – 48,54 GHz	50,4 – 51,4 GHz
	49,44 – 50,2 GHz	
Banda Ku, satélite GEO o no GEO (sujeto a la protección de los sistemas GEO)	10,7 – 12,75 GHz	12,75 – 13,25 GHz
		13,75 – 14,5 GHz
		5725 – 7025 MHz
Banda C, satélite GEO	3400 – 4200 MHz	(Las sub-bandas 3700 – 4200 MHz y 5925 – 6425 MHz pueden ser utilizadas por satélite no GEO sujeto a la protección de los sistemas GEO)
	4500 – 4800 MHz	

Tabla 26. Espectro de los sistemas satélite [50]

La utilización de satélites provoca una cierta latencia en el plano de control en cuanto al tiempo que tarda el satélite en pasar de un estado de uso de batería eficiente a comenzar a transmitir datos de manera continua. En el plano de usuario también ocurre una cierta latencia en cuanto al tiempo que tarda una aplicación en empezar a transmitir/recibir un paquete o un mensaje. Debido a la distancia a la que se encuentran los satélites, también se produce un cierto retraso entre las comunicaciones entre los usuarios y los satélites, así como un retraso de propagación debido a la interferencia del aire [49] [50]:

Tipo	Latencia	Retraso Usuario-Satélite	Retraso máx. de propagación unidireccional
Objetivo del plano de control	10 ms		
Objetivo para URLLC del plano de usuario	0,5 ms		
Objetivo para eMBB del plano de usuario	4 ms		
Satélites GEO	600 ms	120 – 140 ms	280 ms
Satélites HEO	600 ms		
Satélites MEO	180 ms	27 – 43 ms	90 ms
Satélites LEO	50 ms	3 – 15 ms	30 ms

Tabla 27. Latencia en comunicaciones satélite 5G [15] [51]

Como se puede ver la Tabla 27, debido a los retrasos producidos en las comunicaciones vía satélite, este tipo de comunicaciones se descarta para los servicios ferroviarios de misión crítica, ya que, al estar relacionados con la seguridad y el correcto funcionamiento del tren, se necesita una conexión fiable y continua. Sin embargo, se pueden utilizar las comunicaciones satélite en los espacios abiertos deshabitados por los que pasa el tren para proveer de servicios de banda ancha de Internet a los pasajeros. [50] [15] [51] [49]

Debido a su estudio actual y su futura comercialización pública en el año 2020, nuestra propuesta de diseño se basará en este sistema ya que, como hemos explicado en el posible marco temporal, su despliegue se podría comenzar en el año 2025 y, por lo tanto, equipararse a las redes utilizadas públicamente y aumentar su vida útil. Otros de los motivos de su elección son la mejora de las prestaciones que podrá tener (explicadas anteriormente) así como la posibilidad de conectar un gran número de sensores para llevar a cabo sus servicios.

Actualmente, Samsung y KDDI han completado su primera demostración con éxito de un tren moviéndose a 100 km/h con sistema de comunicaciones 5G en Seúl (Corea del Sur), logrando velocidades de 1,7 Gbps [52]. Huawei y NTT DOCOMO han realizado pruebas con un tren de larga distancia en la banda de 39 GHz consiguiendo 2Gbps a velocidades por encima de los 20 km/h. [53] En España, Adif ha anunciado en el pasado mes de febrero que implantará redes 5G en todas las estaciones de trenes de larga distancia y AVE para convertirlas en estaciones inteligentes conectadas con otros servicios de las ciudades. [54]

4.5. RESUMEN

En este apartado recopilaremos las características principales de los sistemas de comunicaciones explicados:

Características	GSM-R	TETRA	LTE	5G
Bandas de frecuencia	UL: 876-880 MHz DL: 921-925 MHz	400 MHz	450 MHz, 800 MHz, 1,4 GHz, 1,8 GHz	4 GHz, 30 GHz, 70 GHz (Propuestas hasta la fecha)
Ancho de banda de canal	200 kHz	25 kHz	1,4 – 20 MHz	200 MHz – 1 GHz
Modulación	GMSK	$\pi/4$ DQPSK	QPSK, 16QAM	$\pi/2$ BPSK, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Acceso múltiple	TDMA	TDMA	OFDMA/SCFDMA	OFDMA/NOMA/SCDMA
Velocidad máxima de transmisión	172 kbps (VOZ) 9,6 kbps (DATOS)	5-10 kbps (VOZ) 28,8 kbps (DATOS)	DL: 50 Mbps UL: 10 Mbps	DL: 15 Gbps/tren UL: 7,5 Gbps/tren
Movilidad	500 km/h	300 km/h	500 km/h	500 km/h
Rango de la celda	≤ 8 km	10-25 km	4-12 km	Micro: 200m – 2 km Macro: 8 – 30 km
Basado en IP	No de manera autónoma	No	Sí	Sí
Madurez	Maduro	Maduro	Emergente	Emergente
Soporte en el mercado	Hasta 2025-2030	Casi obsoleto	En proceso de estandarización	En proceso de estudio

Tabla 28. Características principales de los sistemas de comunicaciones de los entornos ferroviarios estudiados

5. CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN FUNCIÓN DE SU OPERATIVA EN EL SECTOR FERROVIARIO

5.1. SERVICIOS EN ENTORNOS FERROVIARIOS

Las radiocomunicaciones aportan a los trenes ciertos servicios que se pueden agrupar en tres grupos: servicios relacionados con la seguridad, servicios operacionales no relacionados con la seguridad y servicios proporcionados a los usuarios.

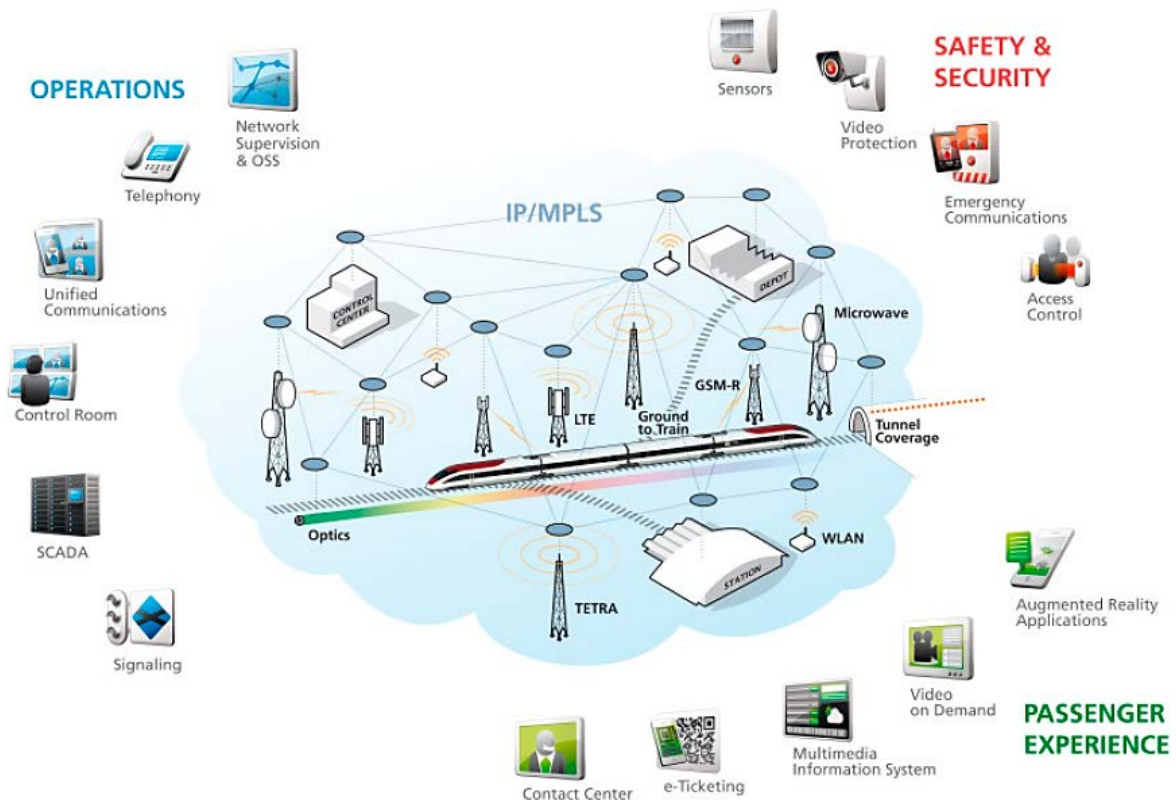


Figura 21. Servicios en entornos ferroviarios [55]

5.1.1 Servicios relacionados con la seguridad

Son aquellos servicios responsables del movimiento seguro del tren, así como de su correcto funcionamiento, necesitan velocidades de transmisión bajas, pero sistemas radio muy fiables. [56] [27] [29]

- **Señalización para trenes de alta velocidad:** la última generación de sistemas de señalización para la vía principal y los trenes de alta velocidad es el ERTMS. Su funcionamiento se divide en tres niveles, de los cuales, el nivel 1 y el 2 están clasificados como servicios de seguridad: [57]
 - Nivel 1: se sustenta en los enclavamientos (circuitos en la vía) que informan sobre el estado de las agujas, señales e itinerarios a las unidades electrónicas normalizadas, las cuales reenvían los datos a las eurobalizas (balizas que cumplen con la especificación del ETCS) situadas en la caja de la vía.
 - Nivel 2: un centro de bloqueo por radio se encarga del bloqueo de trenes. Este centro recibe la información por parte de los enclavamientos y transmite información a otros trenes a través del sistema GSM-R. Esta tecnología se encuentra a nivel mundial.
 - Nivel 3: los datos sobre integridad del tren se envían a través de un sistema propio instalado en el tren, por lo que no son necesarios los circuitos en la vía.

ERTMS es un servicio crítico para la seguridad en el cual los trenes envían información periódicamente sobre su localización para ser reenviada por los equipos de los arcones a las autoridades competentes de su movimiento, respondiéndole al tren en cada punto lo lejos que puede llegar y la velocidad. Esto se hace mediante paquetes pequeños de datos (de menos de 100 bytes), tiempos de entrega menores de 300 ms, retardos de menos de 500 ms y establecimiento de conexión por debajo de los 8,5 segundos.

El ERTMS regional divide la vía en zonas oscuras, en las que sólo puede haber un tren, para utilizar en ellas cobertura GSM-R de manera puntual sin necesidad de circuitos en la vía. Un inconveniente que tiene el ERTMS es que transporta datos mediante una red de intercambio de paquetes, en vez del intercambio de circuitos que utiliza el GSM-R.

- **Señalización para metro:** el sistema de CBTC ('Control de Trenes Basado en Comunicaciones') es el equivalente a ERTMS para trenes subterráneos, pero no está estandarizado. Este sistema hace que los trenes estén cerca (distanciados menos de 80 segundos) y seguros. Cada vendedor tiene su propia implementación basada en la familia de estándares IEEE 802.11 con mensajes cortos (64 bytes) y retardos de 800 ms. Esta tecnología está bien establecida, pero se puede mejorar minimizando los retardos de la cadena de comandos del canal de comunicaciones (procesamiento, transmisión, tiempo de reacción, etc.). Estableciendo comunicaciones directas entre trenes, el retardo punto a punto se reduce drásticamente, se puede hacer mediante un sistema de comunicaciones radio fiable a bordo tipo D2D, capaz de transportar información sólida en tiempo real entre dos trenes (V2V, 'Vehículo a Vehículo'), de manera adicional al sistema de comunicaciones actual tipo V2I ('Vehículo a Infraestructura'). La comunicación V2V tiene sentido en trenes subterráneos ya que, aunque sea difícil para trenes con obstáculos entre ellos, los metros van muy seguidos unos de otros.
- **Llamada de voz de grupo:** comunicaciones de voz entre varios trenes y/o estaciones base o trabajadores que se encuentran en los vagones o en estaciones para el mantenimiento de la infraestructura y el correcto funcionamiento.
- **Difusión de voz:** la estación base envía mensajes de voz a un grupo concreto de trenes en un área definida o viceversa para asegurar las operaciones y/o comunicar problemas existentes en una determinada zona.
- **Comunicaciones de maniobras:** avisa al grupo de trabajadores envueltos en esta operación para que se realice de manera efectiva y evitar problemas con los siguientes trenes que utilicen el mismo tramo de ruta.
- **Comunicaciones de emergencia:** un tren establece una llamada de emergencia con otros ferrocarriles que se encuentran dentro un área configurada basándose en la posición del emisor y en las características de los trenes que se pueden ver afectados por la emergencia.

5.1.2 Servicios operacionales no relacionados con la seguridad

Son aquellos que incluyen servicios para operadores sin implicaciones de seguridad. [56] [31]

- **Información multimedia para los pasajeros:** ofrece a los usuarios del tren información multimedia relacionada con la localización del tren, las paradas, etc. a la que podrán acceder mediante aplicaciones de los móviles. Su evolución va de la mano del sistema de señalización ya que es el que tiene todos los datos necesarios para dar este servicio.
- **Sistema de información al pasajero:** es una herramienta operativa electrónica que avisa a los pasajeros de forma acústica o visual de datos del viaje y se hace de manera automática o programada manualmente. La información llega a tres entornos distintos (vías, instalaciones fijas como las estaciones y el centro de control centralizado) mediante conexiones cableadas o inalámbricas de los dispositivos, el ordenador de la estación y del servidor principal.
- **Circuito Cerrado de Televisión (CCTV):** este servicio provee datos en forma de imágenes o vídeos de alta resolución dentro de los trenes y/o estaciones, por lo que necesita un gran ancho de banda, una base de datos en tiempo real, retardos de 125 ms como máximo y descarga de grabaciones bajo demanda. Las cámaras inteligentes de CCTV no sólo ofrecen grabaciones en

caso de accidente, pueden proporcionar alarmas en tiempo real si existe algún problema potencial, avisando para que se lleve a cabo una intervención. Es clave en el proceso operacional de los metros sin conductor o desatendidos.

- **Sistema de información de mercancías:** se subdivide en dos tipos: soluciones de gestión operacional para la administración de la capacidad y la carga, que abarca desde la organización de las reservas hasta las descargas; y las soluciones de seguimiento para la localización en tiempo real de los contenedores de carga. Este sistema ayuda a tomar decisiones basadas en datos robustos, fiables y consistentes.

5.1.3 Servicios proporcionados a los usuarios

Estos servicios proporcionan acceso a Internet a los pasajeros a bordo del tren. No se trata de una tarea trivial ya que lleva siendo un problema durante los últimos años y no se ha conseguido la calidad adecuada debido al entorno hostil (altas temperaturas, vibraciones, interferencias electromagnéticas, pérdidas de penetración del vehículo, ciberseguridad, coste del servicio y la presencia de túneles. Se han propuesto varias soluciones próximas, entre las que destacan: [56]

- **Basadas en nodos repetidores móviles:** estos dispositivos van a bordo del tren y mejoran la cobertura y la eficiencia espectral. Su función es dividir el enlace directo entre el equipo de usuario a bordo y la estación base en dos segmentos. Situando la antena en el techo del tren se puede mejorar el error máximo y con técnicas de procesamiento digital se pueden solventar los problemas no deseados como el efecto Doppler o el multitrayecto. Sin embargo, el entorno hostil sigue siendo un problema, se incrementa la latencia y se tiene que lidiar con los problemas con las estaciones base.
- **Basadas en satélites:** las principales ventajas son su simpleza (no necesitan redes terrestres) y su bajo coste. Los túneles son un problema para estas comunicaciones, por lo que se necesita una tecnología de respaldo para estos casos. Otras desventajas son, su alto coste operacional y la necesidad de poner grandes antenas en el techo del tren que suponen un impacto en el ancho de la vía y en la aerodinámica.

A continuación, se muestra una clasificación sencilla de los servicios mencionados anteriormente:



Figura 22. Clasificación de los servicios ferroviarios

5.2. SISTEMAS DE COMUNICACIONES SEGÚN SU OPERATIVA

Tras la descripción de los servicios existentes en entornos ferroviarios, a continuación, haremos una clasificación de los mismos y de los sistemas de comunicaciones en función de su operativa:

Sistemas	Servicios	Aplicaciones	Seguridad	Prioridad	Capacidad	Latencia
Sistemas de comunicaciones en escenarios ferroviarios		Tren-Infraestructura	Depende del uso	Depende del uso	Alta	Baja
		Comunicaciones entre vagones y dentro del vagón	Depende del uso	Depende del uso	Alta	Baja
		Dentro de la estación	Depende del uso	Depende del uso	Alta	Baja
		Infraestructura-Infraestructura	Depende del uso	Depende del uso	Alta	Baja
		Redes de sensores (WSN)	Depende del uso	Depende del uso	Alta	Baja
Sistemas de comunicaciones para el control del tren	Servicios relacionados con la seguridad	Sistemas de seguridad y señalización	Si	Alta	Baja	Baja
		Control de sistemas autónomos	Si	Alta	Baja	Baja
		Ciberseguridad en los ferrocarriles	Si	Alta	Baja	Baja
Sistemas de comunicaciones para servicios de información	Servicios proporcionados a los usuarios (también tienen relación con algunos servicios operacionales)	Sistemas de información para pasajeros	No	Baja	Media	Media
		Sistemas de información para mercancía	No	Baja	Media	Media
Sistemas de comunicaciones para infraestructuras	Servicios operacionales no relacionados con la seguridad	Monitorización avanzada de elementos	No	Media	Alta	Media-Baja
		Sistemas de videovigilancia	No	Media	Alta	Media
		Operaciones	No	Media	Alta	Media

Tabla 29. Sistemas de comunicaciones en entornos ferroviarios según su operativa [31] [32] [35] [10]

6. PROPUESTA DE DISEÑO DEL DESPLIEGUE DE SERVICIOS Y TECNOLOGÍAS 5G EN EL ENTORNO FERROVIARIO

El transporte ferroviario está aumentando de manera rápida en todos los países, como consecuencia se requieren nuevas necesidades para el control y la señalización de los trenes, así como altas capacidades de comunicación para los pasajeros. Los actuales sistemas de comunicación ferroviaria que se basan principalmente en GSM-R se están quedando obsoletos por sus limitaciones, por lo que para poder proporcionar estos servicios se plantea una migración de sistemas y señales a 5G. [56] [58]

6.1. REQUISITOS ESPECÍFICOS DE LA TECNOLOGÍA 5G PARA SATISFACER LAS EXIGENCIAS TÉCNICAS DE LA OPERATIVA FERROVIARIA

Antes de implantar una nueva generación de comunicaciones en el ferrocarril existe la necesidad de solucionar varios retos: [58]

1. El desarrollo de un sistema de comunicaciones de capacidad media con alta fidelidad y disponibilidad para los servicios críticos (relacionados con la seguridad).
2. El desarrollo de una red de comunicaciones dentro del tren para sus equipos y operativa no crítica del tren.
3. El desarrollo de comunicaciones de alta velocidad para los pasajeros.

También se tienen que solventar ciertos problemas con las tecnologías actuales implantadas en los trenes: [56]

- **Convergencia radio:** en la actualidad, para cada servicio se necesita un sistema debido a la naturaleza de cada uno y los distintos tiempos que necesitan. Por ejemplo, en el metro de Madrid hay cuatro sistemas diferentes para abarcar los servicios de señalización y control, video vigilancia, comunicaciones por voz y mantenimiento. Esto se puede solucionar utilizando un único sistema de comunicación que ofrezca todos los servicios mediante la agregación de los flujos de tráfico de los distintos servicios.
- **Comunicaciones inalámbricas:** en los ferrocarriles de hoy en día existen cientos de metros de distintas variedades de cableado con sus respectivos conectores. Todos estos cables producen averías y altos costes de mantenimiento, por lo que es mejor tender al uso de comunicaciones mediante enlaces inalámbricos seguros y fiables.
- **Escenarios de alta velocidad:** estos trenes pueden alcanzar los 300-500 km/h, produciéndose multitrayecto y dispersión (debida al efecto *Doppler*) de las señales. Otro problema surge con la estimación del canal, si las señales de referencia toman muestras en un período mayor que el tiempo de coherencia del canal (inversamente proporcional al desplazamiento *Doppler*) la comunicación puede deteriorarse.

6.2. PROPUESTA DE MIGRACIÓN E IMPACTO DE LAS TECNOLOGÍAS EN LA INFRAESTRUCTURA

Tras realizar el estudio y análisis de las prestaciones teóricas de las tecnologías del sistema de comunicaciones 5G en entornos ferroviarios, así como de sus características, en este apartado se explicará la propuesta de diseño para proveer de los servicios comentados anteriormente.

Con el objetivo de tener unos mejores servicios en cuanto a disponibilidad y capacidades se propone el uso una red heterogénea utilizando celdas pequeñas (micronivel) y celdas grandes (macronivel).

El macronivel consiste en celdas con un radio grande (del orden de kms) que utilizan frecuencias más bajas, en el que una sola celda puede cubrir toda una estación o una sección grande de la vía en espacios abiertos. Este nivel es similar a los despliegues de uso de GSM-R actuales.

El micronivel consiste en celdas con un radio más pequeño (del orden de metros) que utilizan frecuencias más altas, variando su radio en función de la zona de despliegue. En áreas con muchos dispositivos, donde se espera que haya mayor cantidad de tráfico como las estaciones de tren, las microceldas tienen un tamaño menor. En zonas abiertas, donde la demanda de capacidad es menor, las microceldas tienen un radio mayor pudiendo aproximarse al tamaño de las macroceldas.

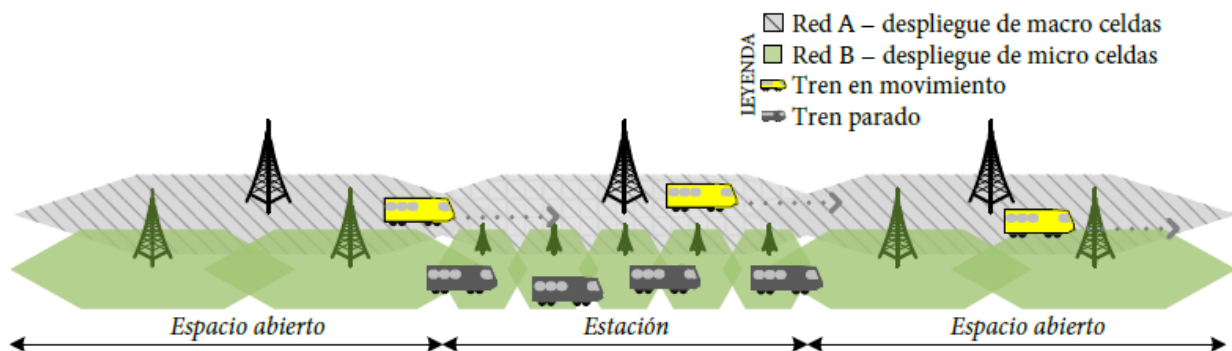


Figura 23. Propuesta de la arquitectura de la red con dos niveles (macro/micro) [33]

Con esta arquitectura de red se provee de una cobertura doble a lo largo de toda la línea, por lo que se obtiene una mayor disponibilidad. En el macronivel el ratio de traspasos es pequeño debido a su gran tamaño, en condiciones normales, en las que no hay fallos, se pretende utilizar este nivel para los trenes en movimiento. En el micronivel, la capacidad es alta debido al mayor número de celdas desplegadas y a la utilización de frecuencias más altas, se pretende utilizar este nivel para los trenes parados y los que se mueven a velocidades bajas dentro de las terminales. Aunque haya un gran número de celdas, los traspasos entre microceldas no son un problema debido a las bajas velocidades de los trenes. En este despliegue la carga de tráfico es más estable ya que se diferencia entre los trenes en funcionamiento y los parados. De esta manera, los trenes en movimiento tienen una experiencia estable en cuanto a carga de tráfico en todas las celdas que atraviese, mientras que los trenes parados no experimentan un pico de tráfico cuando otro tren pasa a la misma altura. Con este diseño se puede utilizar la tecnología 5G para los dos niveles utilizando diferentes frecuencias y pudiendo aprovechar los beneficios de las bandas milimétricas (comentado en el capítulo 3) para el micronivel. También se pueden utilizar LTE o GSM-R en las macroceldas o LTE en las microceldas, lo cual facilita la transición para la nueva generación de comunicaciones en los ferrocarriles. Se prevé que esta etapa dure varios años, como se ha comentado anteriormente, por lo que se puede iniciar el despliegue de la red 5G en las celdas pequeñas, utilizando para las macroceldas la tecnología GSM-R actual, y en un futuro terminar la migración introduciendo los sistemas 5G para las celdas mayores y eliminando definitivamente el GSM-R.

Este despliegue gradual de la red 5G consta de dos fases: en la primera, el sistema 5G se utiliza para soportar servicios de voz y datos que no sean críticos y servicios de soporte de negocios, mientras que el sistema GSM-R se encarga de los servicios de voz y datos críticos. En la segunda fase, el 5G se encargará de ambos tipos de servicios y aplicaciones.

Las comunicaciones de los servicios de misión crítica de esta propuesta para las comunicaciones tren-infraestructura se llevarán a cabo mediante macroceldas, ya que requieren de una alta disponibilidad y fiabilidad. Por este motivo se opta por la banda baja de frecuencias (por debajo de 1 GHz) para evitar los efectos de absorción o dispersión que pueden dificultar las comunicaciones. A la fecha de redacción de este TFG (Trabajo Fin de Grado) las bandas por debajo de 4 GHz no

han sido estudiadas para entornos ferroviarios de alta movilidad, por lo que se utilizarán comunicaciones GSM-R para servicios relacionados con la seguridad en la banda de 900 MHz, como se hace actualmente. Y, en un futuro cuando las capacidades 5G en entornos ferroviarios se expandan a las comunicaciones de misión crítica (*Release 16*, finalización en junio de 2019), se estudiará su uso en este sector. Las características de las comunicaciones uRLLC para esta clase de servicios son:

Características	Valores	Uds.
Tecnología	GSM-R Terrestre	
Banda de frecuencias	900	MHz
Ancho de banda	1-10	MHz
Velocidad	< 10	Mbps
Modulación	OFDM-QPSK	
Retardo	< 50	ms
Servicios	Voz/datos/vídeo	
Movilidad	450	Km/h
Disponibilidad	>99,99	%

Tabla 30. Características de las comunicaciones tren-infraestructura para los servicios relacionados con la seguridad de la red propuesta [58]

Actualmente la red de comunicaciones del interior del tren es un Sistema de Control y Gestión (TCMS) cableado. Se propone cambiarlo a una red inalámbrica de sensores distribuidos a lo largo del tren para realizar las mismas funciones y así poder monitorizar su actividad, control y gestión, a la vez que se reducen los costes de mantenimiento en comparación con la red cableada. Las comunicaciones se llevarán a cabo mediante un despliegue de microceldas a alta frecuencia ya que se necesita una latencia mínima para poder llevar a cabo conexiones en tiempo real y fiables. Con la utilización de antenas MIMO masivo con direccionamiento de rayo se podrán direccionar las conexiones con los sensores y así evitar las pérdidas de propagación que se producen a altas frecuencias y los problemas que pueden producir las paredes metálicas de los trenes durante el trayecto de las señales transmitidas. Con 5G será posible la comunicación D2D, posibilitando el intercambio de datos entre los sensores y así poder llevar a cabo comunicaciones mMTC eficientes. Las características de estas comunicaciones se muestran a continuación:

Característica	Valor	Uds.
Tecnología	5G Terrestre	
Banda de frecuencias	70	GHz
Ancho de banda	100-1000	MHz
Velocidad	1-10	Gbps
Modulación	QAM	
Retardo	< 10	ms
Servicios	Voz/datos/vídeo	
Movilidad	Baja	
Disponibilidad	>99,999	%

Tabla 31. Características de las comunicaciones del interior del tren para los servicios operacionales de la red propuesta [58]

Las comunicaciones para los pasajeros se basarán en celdas pequeñas que podrán ofrecerles servicios de banda ancha de calidad, incluso en zonas con un gran despliegue de dispositivos. Con antenas de tipo MIMO masivo y direccionamiento de haz, la gran capacidad de las comunicaciones eMBB mediante bandas milimétricas se hará de manera más eficiente. Para evitar En las zonas deshabitadas se podrán utilizar comunicaciones vía satélite como se ha comentado en el apartado 4.4., evitando que los usuarios se queden sin conexión al atravesar este tipo de áreas. En la Tabla 32 se muestran las características de este tipo de comunicaciones en entornos ferroviarios:

Características	Valores	Uds.
Tecnología	5G Terrestre/satélite	
Banda de frecuencias	Terrestre: 30 Satélite: 11 – 14	GHz
Ancho de banda	100-500	MHz
Velocidad	1 (Terrestre) 0,2 (satélite)	Gbps
Modulación	Adaptable	
Retardo	< 500	ms
Servicios	Voz/datos	
Movilidad	Alta (400 km/h)	
Disponibilidad	>95	%
Conexiones de usuarios	90	%

Tabla 32. Características de las comunicaciones del tren para los servicios para los pasajeros de la red propuesta [58]

Como se ha comentado, la infraestructura de 5G se aplicará para el nivel de microceldas (bandas milimétricas) y los servicios no relacionados con la seguridad, con mástiles separados entre 500 m y 1 km. En estas celdas se podrán incluir antenas adicionales utilizando la tecnología de MIMO para ofrecer una mayor capacidad. Para el caso del uso de redes de sensores para llevar a cabo ciertos servicios, como la monitorización de la infraestructura, será necesario implantar sensores y/o dispositivos tanto en el tren como en la infraestructura.

En ambos casos, los mástiles se implantarán a lo largo de la vía para utilizar celdas longitudinales y por lo tanto obtener mayores coberturas lineales. En la Figura 26 se muestra la infraestructura descrita: [35]

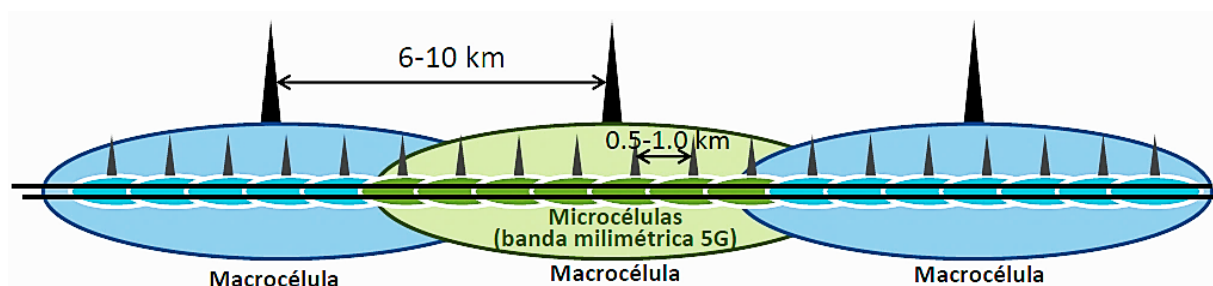


Figura 24. Infraestructura radio de la próxima generación de trenes [35]

A continuación se resumen los puntos más importantes de la propuesta de despliegue comentada en este capítulo:

- Despliegue progresivo de la tecnología 5G para los distintos servicios:
 - 1º) Servicios para los pasajeros.
 - 2º) Servicios operaciones no relacionados con la seguridad.
 - 3º) Servicios relacionados con la seguridad.
- Los servicios para los pasajeros se llevarán a cabo mediante celdas pequeñas en la banda de frecuencias de 30 GHz.
- Los servicios operacionales no relacionados con la seguridad se llevarán a cabo mediante microceldas en la banda de frecuencias de 70 GHz.
- Los servicios relacionados con la seguridad se llevarán a cabo mediante macroceldas en la banda de frecuencias de 900 MHz.

6.3. ROADMAP TENTATIVO PARA EL DESPLIEGUE DE SERVICIOS 5G EN ENTORNOS FERROVIARIOS

Como se ha comentado en el capítulo 2, el despliegue de las redes 5G comenzará en el año 2020, por lo que para entornos ferroviarios se presenta el siguiente posible marco temporal:

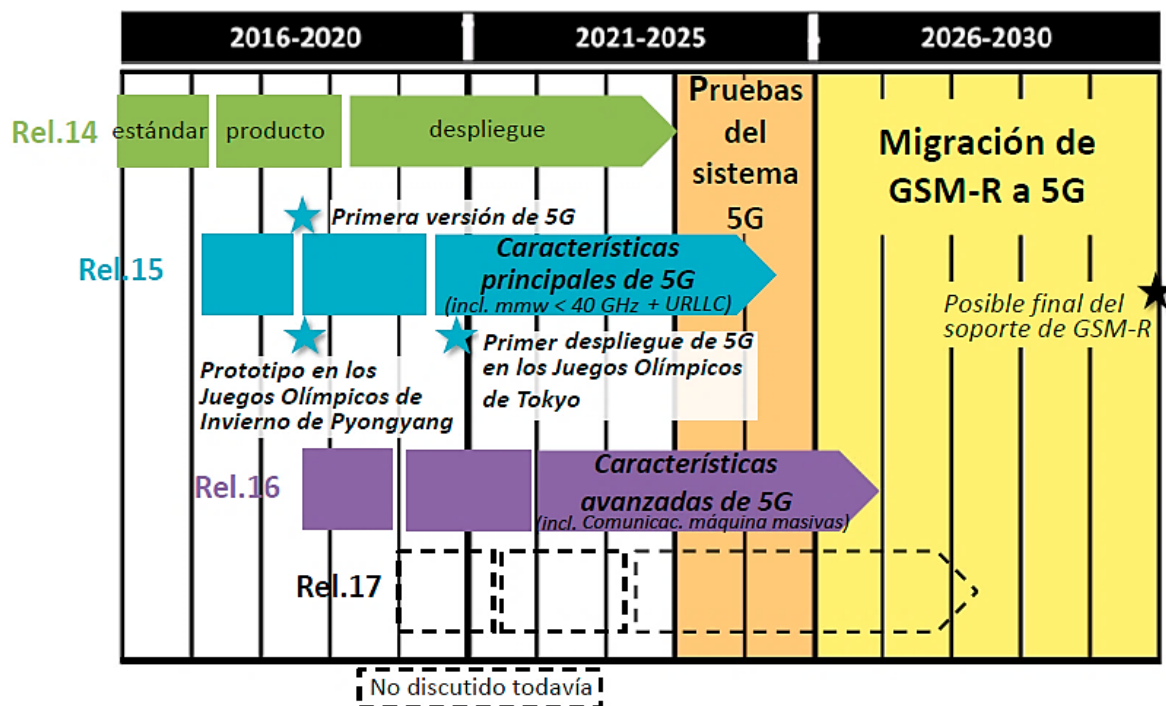


Figura 25. Posible marco temporal de la migración de GSM-R a 5G [35]

De acuerdo al posible marco temporal mostrado y a los tiempos de finalización estipulados por el 3GPP, la *Release 15*, que corresponde a la primera fase de estudio de 5G (el estudio previo se llevó a cabo en la *Release 14* con la preparación inicial de la descripción e información para comunicárselo a la ITU-R), finalizará su estandarización en septiembre de 2018. Esta fase incluye el estudio de los requisitos y la evaluación del despliegue de comunicaciones eMBB, mMTC y uRLLC en entornos de prueba para las funciones de 5G y LTE, realizándose el primer despliegue completo en entornos reales en los Juegos Olímpicos de Tokio en 2020, por lo que se prevé que en entornos ferroviarios esta fase se lleve a cabo más tarde, a partir del año 2020, y las pruebas de 5G en este sector se realicen entre 2024 y 2025.

La *Release 16* comenzará tras la finalización del estándar de la *Release 15* en septiembre de 2018, en paralelo con las pruebas de despliegue en entornos reales de la *Release 15*, y esta especificación se completará en junio 2019. Esta segunda fase corresponde a la actualización de la evaluación de rendimiento teniendo en cuenta las últimas versiones (15 y 16), tras incluir las especificaciones de las comunicaciones y características más complejas y específicas, produciéndose la comercialización del 5G en agosto de 2020. En escenarios ferroviarios, tras las pruebas realizadas y la implantación pública del 5G, posiblemente a principios del año 2026, comenzará la migración hacia esta nueva generación de comunicaciones con un tiempo de implantación de redes basadas completamente en 5G de unos 5 años, considerándose el 2030 como año de finalización del uso de GSM-R. [35] [38]

7. CONCLUSIONES

Los sistemas de comunicaciones en entornos ferroviarios basados en GSM se están quedando obsoletos por lo que la búsqueda de la siguiente generación de comunicaciones en este sector es necesaria.

Tras realizar un estudio y analizar las características y prestaciones teóricas de la tecnología 5G, esta se brinda como potencial sucesor de los sistemas actuales ya que, gracias a las nuevas oportunidades que brinda como la utilización de bandas milimétricas, el MIMO masivo, las “particiones” de red o las comunicaciones M2M y a la aparición de los nuevos escenarios de uso de eMBB, mMTC y uRLLC, es posible mejorar las comunicaciones actuales en entornos ferroviarios de alta movilidad y hacerlas más eficientes.

Con un despliegue híbrido de red GSM-R y 5G, aplicando el primero para las macroceldas de la red y el segundo para las microceldas, se posibilita la reutilización de los sistemas actuales para las comunicaciones relacionadas con los servicios de seguridad y control del tren mientras el uso de 5G para comunicaciones de misión crítica se encuentra bajo estudio. De esta forma se mantienen las aplicaciones de los sistemas de comunicaciones para el control del tren actuales en la banda de 900 MHz sin afectar al funcionamiento de los sistemas de señalización o a los servicios de llamada de emergencia, llamada de grupo o difusión de voz, entre otros.

La utilización del 5G se ha especificado por parte del 3GPP (hasta la fecha) en las bandas de frecuencias de 4 GHz, 30 GHz y 70 GHz. Gracias a su arquitectura de la red de acceso, 5G es compatible con otros sistemas como GSM o LTE, haciendo posible este despliegue híbrido. Con la virtualización de las funciones de red y el uso de SDN, es posible realizar “particiones” de red creando redes lógicas separadas e independientes en las que cada partición está hecha a medida para un caso de comunicación específico. Por lo que se ha optado por esta tecnología para los servicios operacionales no relacionados con la seguridad en la banda de 70 GHz, alcanzando velocidades de 10 Gbps y retardos menores de 10 ms. Aunque se cambie la tecnología de las comunicaciones, los servicios de información multimedia para los pasajeros, CCTV y los sistemas de información al pasajero y de mercancías actuales se mantienen, aunque ahora las comunicaciones se basan en IP y en la conmutación de paquetes, haciéndolos más escalables. Se crea la posibilidad de ampliar estos servicios con la monitorización avanzada de problemas gracias al despliegue de una red de sensores, el mantenimiento predictivo con el uso de algoritmos de análisis de *Big Data*, el uso de cámaras inteligentes de alta definición para CCTV y mejores prestaciones para los sistemas de información. Para las comunicaciones del tren para ofrecer servicios a los pasajeros se ha optado por la banda de 30 GHz para comunicaciones terrestres logrando velocidades de 1Gbps, pudiendo utilizarse comunicaciones satélite en la banda de 30 GHz en zonas despobladas alcanzando velocidades de 0,2 Gbps. Estas comunicaciones tienen unos retardos mayores (< 500 ms) que las de la banda de 70 GHz, pero no supone ningún problema en la operativa ferroviaria y mejora la experiencia actual de los pasajeros aportando una mayor calidad y velocidad del servicio de acceso a Internet.

La comercialización pública de 5G se comenzará en el año 2020, por lo que, tras las fases de estudio y pruebas en entornos ferroviarios, la etapa de migración hacia 5G en este sector comenzará, previsiblemente, en el año 2026, estimándose la finalización de uso de GSM-R en el año 2030.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] National Infrastructure Commission, «Connected Future», 2016.
- [2] NTT Docomo, «5G Radio Access: Requirements, Concept and Technologies», *NTT DOCOMO White Paper*, jul-2014.
- [3] BEEcube, «Challenges and Solutions in Prototyping 5G Radio Access Network», 2014.
- [4] A. Nordrum, K. Clark, y IEEE Spectrum Staff, «Everything you need to know about 5G», 27-ene-2017. [En línea]. Disponible en:
<https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/everything-you-need-to-know-about-5g>.
- [5] Huawei, «5G : A Technology Vision», *Huawei*, Páginas 1-16, 2014.
- [6] L. Miller, *5G RF for dummies*, Qorvo. John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [7] RYSAVY y 5G Americas, «Mobile Broadband Transformation LTE to 5G», 2016.
- [8] ElenaNeira.com, «China Moves a Step Closer to 5G», 2016. [En línea]. Disponible en:
<http://elenaneira.com/5g/china-moves-a-step-closer-to-5g/#.Wq-jEejOXIV>.
- [9] 5G Americas, «5G Services and Use Cases», Páginas 1-52, 2017.
- [10] José I. Alonso, «El impacto de las redes de radiocomunicaciones en los nuevos servicios ferroviarios», *Jornada de la PTFE: Tecnologías y competitividad en el transporte de mercancías por ferrocarril*, 27-feb-2018.
- [11] 5G PPP y European Commission, «5G Empowering Vertical Industries», *5G-PPP White Papers*, 2016.
- [12] S. E. Elayoubi y otros, «5G service requirements and operational use cases: Analysis and METIS II vision», *EUCNC 2016 - European Conference on Networks and Communications*, 2016.
- [13] Telefónica, «Respuesta de Telef», *Consulta pública del MINETAD, Plan Nacional de 5G*, 2018.
- [14] NetManias, «5G New Radio Interface: CP-OFDM Scenario in eMBB», 2018. [En línea]. Disponible en:
<https://www.netmanias.com/en/post/blog/13237/5g-new-radio/5g-new-radio-interface-cp-ofmd-scenario-in-embb>.
- [15] ETSI y 3GPP, «5G: Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (ETSI TR 138.913)», may-2017.
- [16] NTT DOCOMO, «DOCOMO's 5G Outdoor Trial Achieves 4.5Gbps Ultra-high-speed Transmission — Aiming at 5G launch by Tokyo 2020 Olympic and Paralympic Games —», 02-mar-2015. [En línea]. Disponible en:
https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media_center/pr/2015/0302_03.html.
- [17] ITU, «Celebración del Reglamento de Radiocomunicaciones», *ITU NEWS MAGAZINE*, N.º 5, 2016.
- [18] ITU, «Abrir sendas hacia 5G», *ITU NEWS MAGAZINE*, N.º 2, 2017.
- [19] 5G PPP y European Commission, «The European 5G Annual Journal», 2016.
- [20] 5G PPP, 5G IA, y European Commission, «The European 5G Annual Journal», 2017.
- [21] Ministerio de Energía Turismo y Agenda Digital, «Plan Nacional 5G 2018-2020», 01-dic-2017.
- [22] Ministerio de Energía Turismo y Agenda Digital, «Boletín oficial del estado», *Sec. III, Otras Disposiciones*, N.º 128, Páginas 55021-55044, may 2018.

- [23] Ministerio de Energía Turismo y Agenda Digital, «Boletín oficial del estado», *Sec. III. Otras Disposiciones*, N.º 101, Páginas 46063-46077, abr. 2018.
- [24] Secretaría de Estado de Comunicación, «Consejo de Ministros», *Energía, Turismo y Agenda Digital*, Páginas 8-9, 23-feb-2018.
- [25] Ministerio de Energía Turismo y Agenda Digital, «Resolución de la Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital por la que se habilitan determinadas bandas de frecuencias para la realización de pruebas piloto contempladas en el Plan Nacional 5G», 14-feb-2018.
- [26] T. I. of E. and Technology, *5G Wireless Technologies*. 2017.
- [27] R. He y otros, «High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R», *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Páginas 49-58, 26-ago-2016.
- [28] Sepura, «A comparison of TETRA and GSM-R for railway communications».
- [29] ITU-R, «Description of Railway Radiocommunication Systems between Train and Trackside (RSTT)», *M.2418-0*, nov-2017.
- [30] M. Liem, V. B. Mendiratta, y Alcatel-Lucent, «Mission Critical Communication Networks for Railways», *Bell Labs Technical Journal*, 2011.
- [31] P. Fraga-Lamas, T. M. Fernández-Caramés, y L. Castedo, «Towards the internet of smart trains: A review on industrial IoT-connected railways», *Sensors*, Vol. 17, N.º 1457, Suiza, 21-jun-2017.
- [32] V. Nedviga y otros, «Proyecto MISTRAL: Futuros escenarios de comunicaciones tren-tierra de nueva generación», nov-2017.
- [33] A. Sniady, J. Soler, y L. Dittmann, «Communication Technologies Support to Railway Infrastructure and Operations», Technical University of Denmark, may-2015.
- [34] UIC, L. Pushparatnam, y T. Taylor, «GSM-R Procurement & Implementation Guide», París, 15-mar-2009.
- [35] D. Mottier y Mitsucishi Electric, «How 5G technologies could benefit to the railway sector : challenges and opportunities», nov-2016.
- [36] A. Esteban y S. Solanas, «The Viability of TETRA for ETCS Railway Signalling System», *Sepura*, 2016.
- [37] C. Briso-Rodríguez y otros, «Broadband access in complex environments: LTE on railway», *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E97-B, N.º 8, Páginas 1514-1527, ago-2014.
- [38] 3GPP, «Release 16». [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/release-16>.
- [39] J. Calle-Sanchez, M. Molina-Garcia, y J. I. Alonso, «Top challenges of LTE to become the next generation railway communication system», *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol. 127, Páginas 85-95, 2012.
- [40] 3GPP, «Study on architecture enhancements to support Group Communication System Enablers for LTE (GCSE_LTE)», *TR 23.768 V12.1.0*, N.º Release 12, jun-2014.
- [41] ITU-R, «Introduction to railway communication systems», *M.2395-0*, nov-2016.
- [42] 3GPP, «Physical channels and modulation (Release 15)», *TS 38.211 V15.1.0*, N.º Release 15, mar-2018.
- [43] NTT Docomo, «Technical Journal», Vol. 19, N.º 3, ene-2018.
- [44] Ericsson, «5G Radio Access», *White Paper*, abr-2016.
- [45] 3GPP, «NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2», *TS 38.300 V15.1.0*, N.º Release 15, mar-2018.
- [46] 3GPP, «Service requirements for the 5G system; Stage 1», *TS 22.261 V16.3.0*, N.º Release 16, mar-2018.

- [47] F. Hasegawa y otros, «High-Speed Train Communications Standardization in 3GPP 5G NR», *IEEE Communications Standards Magazine*, Páginas 44-52, mar-2018.
- [48] 3GPP, «System Architecture for the 5G System; Stage 2», *TS 23.501 V15.1.0*, N.º Release 15, mar-2018.
- [49] Railway Association of Canada, «Canadian Rail Communication: Beyond 2020», oct-2017.
- [50] 3GPP, «Study on New Radio (NR) to support non terrestrial networks», *TR 38.811 V0.3.0*, N.º Release 14, dic-2017.
- [51] 3GPP, «Study on using Satellite Access in 5G; Stage 1», *TR 22.822 V0.12.0*, N.º Release 16, feb-2018.
- [52] Samsung, «KDDI and Samsung Complete First Successful Demonstration of 5G on a Train Moving at 100km/hour», 2017. [En línea]. Disponible en:
<http://www.samsung.com/global/business/networks/insights/news/kddi-and-samsung-complete-first-successful-demonstration-of-5g-on-a-train-moving-at-100kmh/>.
- [53] Huawei, «Huawei and NTT DOCOMO Achieves a New Breakthrough in 5G mmWave Long-Distance Mobility Trial over 39 GHz Band», 2017. [En línea]. Disponible en:
<http://www.huawei.com/en/press-events/news/2017/12/NTT-DOCOMO-5G-mmWave-Trial>.
- [54] Europa Press, «Adif lanza un plan de estaciones de tren “inteligentes”», 2018. [En línea]. Disponible en:
<http://www.europapress.es/economia/noticia-adif-lanza-plan-estaciones-tren-inteligentes-20180201124055.html>.
- [55] A. Bertout y Alcatel-Lucent, «Next Generation of Railways and Metros wireless communication systems», *IRSE News*, 2012.
- [56] J. Moreno, J. M. Riera, L. De Haro, y C. Rodriguez, «A Survey on Future Railway Radio Communications Services : Challenges and Opportunities», *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53, N.º 10, Páginas 62-68, oct-2015.
- [57] Adif, «ERTMS, Sistema Europeo de Gestión de Tráfico». [En línea]. Disponible en:
http://www.adif.es/es_ES/ocio_y_cultura/fichas_informativas/ficha_informativa_00026.shtml.
- [58] A. Gonzalez-plaza, J. Moreno, I. Val, A. Arriola, P. M. Rodriguez, y F. Jimenez, «5G Communications in High Speed and Metropolitan Railways», *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Páginas 658-660, 18-may-2017.

9. ANEXO I: TEMAS ÉTICOS, SOCIALES, ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

9.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los sistemas de comunicaciones críticas se hacen cargo de las comunicaciones relacionadas con el correcto funcionamiento y la seguridad de los ferrocarriles mediante tecnologías GSM-R, como pueden ser, por ejemplo, los servicios de señalización o a las llamadas de emergencia.

Los sistemas GSM-R también son utilizados para las comunicaciones relacionadas con la operativa de los trenes pero que no tienen relación con la seguridad del tren como el CCTV o la señalización del tren (que no afecte a la seguridad).

Los sistemas que no utilizan GSM-R a día de hoy son los relacionados con proporcionar servicios a los pasajeros. Estos utilizan comunicaciones 3G o 4G, pero los servicios que prestan no tienen la calidad deseada por los usuarios.

Debido a la evolución de las comunicaciones y al “estancamiento” de las mismas en entornos ferroviarios surge la necesidad de mejorar los sistemas actuales que se están quedando obsoletos y a los que se les puede añadir nuevas funcionalidades. Las comunicaciones GSM-R son limitadas en cuanto a ancho de banda y con una nueva generación de sistemas, este problema se podría resolver aumentando el ancho de banda disponible y mejorando sus prestaciones haciendo las comunicaciones más eficientes, así como llevar a cabo una adaptación a la evolución tecnológica como se está realizando en los distintos mercados verticales.

Con la mejora de las comunicaciones en este entorno se aumenta la seguridad de los viajeros y trabajadores, llegando incluso a predecir problemas antes de que surjan. También se mejorará la satisfacción de los usuarios ya que se añadirán nuevos servicios proporcionándoles más facilidades y mejorando los actuales (por ejemplo, los servicios de acceso a Internet para los pasajeros no tienen una buena calidad a día de hoy). Con la implantación de una nueva generación de comunicaciones y las nuevas prestaciones que se podrán obtener, se incrementará la confortabilidad y mejorará el acceso a los sistemas y servicios proporcionados. En el ámbito de estudio del presente Trabajo Fin de Grado, no se encuentra ningún colectivo en concreto perjudicado ya que las personas afectadas por el mismo son los usuarios y trabajadores del ferrocarril, entre los que se encuentran colectivos muy diversos.

En cuanto al uso de recursos, los trenes que se utilizarán para estas comunicaciones tienen previsto ser los mismos que se utilizan a día de hoy, no existe la necesidad de reemplazarlos y, con la preocupación medioambiental que existe se está intentando convertir tanto los trenes como las estaciones y cualquier entorno relacionado con el ferrocarril lo más ecológico y eficiente posible. Por lo que, la intención es aprovechar los sistemas de comunicaciones actuales siempre que se pueda (simplemente actualizándolos) reduciendo el impacto ambiental y el uso innecesario de nuevos recursos.

9.2. DESCRIPCIÓN DE IMPACTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON EL PROYECTO

Como se ha indicado en el apartado anterior, los grupos de interés dentro del ámbito de estudio de este TFG son los usuarios y trabajadores de los entornos ferroviarios, sin centrarse en ningún colectivo en concreto.

Los aspectos e impactos más relevantes que afectarán a dichos grupos de interés son los siguientes:

- **Aumento de la seguridad:** gracias a la nueva generación de sistemas, se podrán llevar a cabo comunicaciones en tiempo real, aumento de la recolección y análisis de datos relevantes, la

monitorización de problemas, así como la resolución de inconvenientes gracias al uso de algoritmos que permitirán predecirlos y detectarlos incluso antes de que ocurran.

- **Aumento de la calidad de los servicios:** con la mayor disponibilidad de ancho de banda se podrán obtener mayores capacidades y velocidades de transmisión de datos, ya sea para ofrecer servicios de internet para los usuarios o para el intercambio de información entre los sistemas relacionados con la operativa y la seguridad de los trenes. Con la utilización de distintas bandas de frecuencia para cada tipo de servicios, se podrán adecuar los servicios a sus características y hacer las comunicaciones más eficientes.
- **Implantación de nuevas prestaciones:** el aumento de la capacidad y de la velocidad de las comunicaciones de la siguiente generación, permitirá llevar a cabo un mantenimiento predictivo junto con la tecnología *Big Data*, la monitorización avanzada de problemas gracias a las redes de sensores y al intercambio de grandes cantidades de datos, la automatización de procesos o la aparición de sistemas autónomos.

Existen varias características que influyen en todos los impactos comentados anteriormente por igual:

- **Grupos afectados:** tanto los usuarios como los operarios se verán afectados de los cambios que se producirán en los entornos ferroviarios.
- **Normativa:** se deberán cumplir los requisitos y normas impuestos los distintos organismos de estandarización (3GPP, ITU, CENELEC, CNAF, etc.) así como la legislación nacional y/o europea vigente en términos de espectro radioeléctrico.
- **Tiempo de implantación:** hay que tener en cuenta, como se ha explicado en el apartado 6.3., el tiempo en el que se van a producir los cambios, produciéndose estos, en un plazo de unos 5 años tras iniciar la implantación de 5G en entornos ferroviarios en el año 2026. Dichos tiempos son teóricos, por lo que podrían producirse cambios cuando se lleve a cabo la implantación.

9.3. ANÁLISIS DETALLADO DE ALGUNO DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS

En relación con los impactos comentados en el apartado 9.2., nos centraremos en la implantación de nuevas prestaciones.

Como hemos visto en el capítulo 6, en la propuesta de diseño del despliegue de tecnologías 5G en entornos ferroviarios, se prevé implantar la misma de manera progresiva: primero en los servicios ofrecidos a los pasajeros, después en los servicios relacionados con la operativa del tren (no relacionados con la seguridad) y finalmente, en los servicios relacionados con la seguridad del tren.

A continuación haremos un análisis sobre los cambios que se producirán en cada uno de ellos:

- **Servicios para los pasajeros:** actualmente estos servicios no tienen buena calidad debido a su baja capacidad y velocidad, así como, a la disposición del pasajero sólo de contenidos precargados. Con el 5G se podrán ofrecer velocidades mucho mayores y la posibilidad de descargar y/o consumir contenidos en *streaming* durante el viaje. También se llevará a cabo una digitalización de ciertos servicios de información, proporcionando datos en tiempo real a través de distintas plataformas y/o dispositivos, y de otros servicios que afectan a los usuarios como el *e-ticketing* ('Servicio de Billetes Electrónicos') que reducirá los tiempos de espera en la venta y gestión de billetes en comparación con los sistemas tradicionales.
- **Servicios operacionales no relacionados con la seguridad:** a día de hoy, se llevan a cabo mediante comunicaciones GSM-R que están limitadas en cuanto a ancho de banda y su velocidad de transmisión y capacidad son mucho menores en comparación con los sistemas 5G. Gracias a ello, se puede mejorar el sistema de videovigilancia actual con cámaras del CCTV inteligentes que, además de grabar imágenes, podrán enviar alarmas en tiempo real de la ocurrencia de problemas potenciales, anticipando su posible resolución. Los sistemas que

proporcionan información acústica y/o visual (localización del tren, tiempos de espera, avisos, etc.) a los pasajeros ofrecerá datos en tiempo real, a diferencia de la precarga de los mismos que se hace a día de hoy o evitando el cierto retraso producido en la información relevante más reciente. La gestión de los procesos relacionados con la mercancía se encuentra bastante desatendida, con 5G se podrá realizar de manera remota y en tiempo real (aunque la monitorización dentro de un tren de mercancías no es útil ya que los vagones no son atendidos y no tienen suministro constante de energía).

- **Servicios relacionados con la seguridad:** actualmente estos sistemas utilizan comunicaciones GSM-R, y como se ha comentado anteriormente, tienen capacidades limitadas. Con la próxima generación de comunicaciones se podrán utilizar redes de sensores, gracias a las cuales se podrán monitorizar distintas operaciones y/o características de los entornos ferroviarios. Se podrá medir y ajustar de manera remota la velocidad del tren, también se podrá controlar el funcionamiento de los frenos a distancia, por ejemplo, esto evitará problemas y/o atropellos en los pasos a nivel si se combina su uso con cámaras. Otra funcionalidad de la que se dispondrá será la gestión de los semáforos y las señales en función del estado y posición del tren. Se mejorarán los sistemas de señalización de los trenes ya que se podrán comunicar entre ellos gracias a las comunicaciones M2M entre dispositivos de manera autónoma y veloz, lo cual servirá para informar de ciertos problemas de manera más rápida que actualmente. Con estas redes de sensores se obtendrán cantidades de datos mucho mayores que las que se obtienen hoy en día que los sistemas existentes no podrían soportar ni gestionar, sin embargo, los sistemas 5G serán capaces de transmitirla y analizarla de manera eficaz, obteniendo resultados fiables y con memoria, es decir, en función de lo ocurrido anteriormente, llegando incluso a predecir acontecimientos.

9.4. CONCLUSIONES

La actualización de los sistemas de comunicaciones actuales en los entornos ferroviarios supondrá un aumento de la calidad de los servicios, a la certeza de seguridad y sistemas de señalización, y a los distintos servicios operacionales gracias a la implantación de nuevas prestaciones y/o mejora de las actuales.

Con la mejora de dichos servicios también se mejorará la seguridad y la calidad de la experiencia tanto por parte de los usuarios como de los trabajadores en el ámbito del ferrocarril.

En un principio, no se prevé que el ámbito de estudio de este TFG tenga alguna implicación ética o medioambiental y los resultados obtenidos respetan las normativas vigentes, así como la ética profesional.

Los resultados obtenidos son susceptibles a cambios según se vaya estandarizando y redactando la normativa, tanto en ámbito nacional como europeo, de los sistemas de comunicaciones 5G y de los mismos en entornos de alta velocidad y/o ferroviarios.

10. ANEXO II: PRESUPUESTO ECONÓMICO

El presente Trabajo Fin de Grado pretende llevar a cabo un análisis y una propuesta de diseño del despliegue de tecnologías 5G en entornos ferroviarios de alta movilidad, por lo que la realización del mismo se organiza de la siguiente manera:

- Un empleado (recién graduado del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación) se encargará de la redacción de la documentación necesaria, lo que implica la recopilación de información del tema establecido en dicho TFG, así como el análisis de la misma, y llevará a cabo una resolución de la propuesta planteada.
 - Estas actividades se llevarán a cabo durante 3 meses a jornada completa (40h semanales)
- Un responsable (Catedrático Ingeniero de Telecomunicación) llevará a cabo un seguimiento del trabajo realizado por el empleado nombrado en el punto anterior, resolviendo las posibles dudas y/o problemas surgidos durante la realización del trabajo. También le guiará en los pasos que debe seguir y en los temas que debe abarcar.
 - Este seguimiento se llevará a cabo cada 2 semanas durante los 3 meses de duración del proyecto mediante reuniones de 2h.

En base a lo comentado, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- El recién graduado trabaja un total de 480h (3 meses, de lunes a viernes, 8h/diarias).
- El catedrático trabaja un total de 12h (3 meses, 2 días al mes, 2h/día).
- El sueldo bruto medio de un recién graduado de telecomunicaciones es 21.000,00€/año (dividido en 14 pagas).
- El sueldo bruto medio de un catedrático de telecomunicaciones es de 50.000,00€/año (dividido en 14 pagas).
- Se le entregará a cada empleado un ordenador portátil.

Se han realizado los siguientes cálculos para realizar el presupuesto necesario para llevar a cabo el proyecto:

HONORARIOS

TRABAJADOR	SALARIO ANUAL (14 pagas)	SALARIO MENSUAL	SALARIO/h	SALARIO 3 meses (Duración del proyecto)	SEGURIDAD SOCIAL (30%)	SALARIO + SEGURIDAD SOCIAL (3 meses)
Recién graduado	21.000,00 €	1.500,00 €	9,38 €	4.500,00 €	1.350,00 €	5.850,00 €
Catedrático	50.000,00 €	3.571,43 €	22,32 €	267,86 €	80,36 €	348,21 €
TOTAL						6.198,21 €

Tabla 33. Cálculo de los honorarios

MATERIAL NECESARIO

EQUIPO	PRECIO
Ordenador portátil	1.000,00 €
Ordenador portátil	1.000,00 €
TOTAL	2.000,00 €

Tabla 34. Cálculo de los gastos en material

PRESUPUESTO ECONÓMICO

CONCEPTO	€
Honorarios	6.198,21 €
Material	2.000,00 €
TOTAL	8.198,21 €

Tabla 35. Cálculo del presupuesto económico

Observando los resultados obtenidos en la Tabla 35, el presupuesto mínimo del proyecto del presente TFG se estima, aproximadamente, en 8.200,00€