

Implementación de un sistema GSM-R en la línea ferroviaria Maçanet-Massanes – Cerbère



**Alexander Borrego
Fernández**

Grado en Ing. de Tecnologías
y Servicios de
Telecomunicación

Sistemas de Comunicación

Tutor/a de TF

Víctor Monzón Baeza

**Profesor/a responsable de
la asignatura**

Carlos Monzo Sánchez

08 de enero de 2024

Universitat Oberta
de Catalunya



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Ficha del Trabajo Final

Título del trabajo:	Implementación de un sistema GSM-R en la línea ferroviaria Maçanet-Massanes – Cerbere
Nombre del autor/a:	Alexander Borrego Fernández
Nombre del Tutor/a de TF:	Víctor Monzón Baeza
Nombre del/de la PRA:	Rubén Molina Casasnovas
Fecha de entrega:	08/01/2024
Titulación o programa:	Grado en Ing. de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Sistemas de comunicación
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave	GSM-R, Telecomunicaciones móviles, Seguridad ferroviaria, Eficiencia operativa, Modernización ferroviaria, Coordinación ferroviaria.
Resumen del Trabajo	
<p>Este proyecto se centra en el establecimiento de las bases técnicas para la implementación exitosa de un sistema de telecomunicaciones móviles GSM-R (Global System for Mobile Railways) en la línea ferroviaria convencional (Maçanet-Massanes – Cerbère), ubicada en la provincia de Girona. El objetivo principal es abordar la ausencia de un sistema GSM-R en esta línea y mejorar la infraestructura de comunicaciones.</p> <p>Para la realización del proyecto se ha llevado a cabo un estudio que abarca varios aspectos. Por un lado, una parte analítica que incluye la búsqueda de referencias sobre GSM-R para proporcionar contexto sobre el cual fundamentar el proyecto y líneas futuras. De otro lado, una parte técnica y de aplicación donde se llevan a cabo diferentes tareas para garantizar una implementación exitosa del sistema a todos los niveles, siendo el propósito principal el asegurar un servicio robusto en la totalidad de la vía, cumpliendo con las normativas vigentes de aplicación.</p> <p>Este proyecto supone mejoras sustanciales en la seguridad, la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia en el</p>	

trazado ferroviario, y no solo responde a una necesidad actual, sino que también allana el camino para la modernización continua, sentando las bases para futuras mejoras.

Abstract

This project focuses on establishing the technical bases for the successful implementation of a GSM-R (Global System for Mobile Railways) mobile telecommunications system on the Maçanet-Massanes - Cerbère railway line, located in the province of Girona. The main objective is to address the absence of a GSM-R system on this line and improve the communications infrastructure.

For this project, a study has been carried out that covers several aspects. On the one hand, an analytical part includes the search for references on GSM-R to provide context on which to base the project and future directions. On the other hand, a technical and application part where different tasks are carried out to guarantee a successful implementation of the system at all levels, the main purpose being to ensure a robust service on the entire road, complying with current applicable regulations.

This project represents substantial improvements in safety, operational efficiency and response capacity in emergency situations. It responds to a current need and also paves the way for continued modernization, setting the stage for future enhancements.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Contexto y justificación del Trabajo	1
1.2. Objetivos del Trabajo	4
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	5
1.4. Enfoque y método seguido	6
1.5. Planificación del trabajo	7
1.6. Breve resumen de productos obtenidos	8
1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria	8
2. Estado del arte	10
2.1. Introducción y antecedentes	10
2.2. Evolución de GSM a GSM-R	12
2.3. Características técnicas del sistema GSM-R	13
2.4. Limitaciones y desafíos del sistema GSM-R	14
2.5. Mejoras y proyectos en curso	15
3. Desarrollo	17
3.1. Solución adoptada	17
3.1.1. Subsistema de Radio (BSS)	18
3.1.2. Subsistema de Red y Conmutación (NSS)	19
3.1.3. Subsistema de Estaciones Móviles (MSS)	21
3.1.4. Red Inteligente (IN)	21
3.1.5. Subsistema de Operación y Mantenimiento (OMS)	21
3.2. Topología	22
3.3. Servicios	23
3.3.1. Servicio de Voz	24
3.3.2. Servicio de Datos	24
3.3.3. Equipos Móviles	24
3.3.4. Radio en Cabina	25
3.4. Parámetros de calidad del servicio	25
3.5. Handover	26
3.6. Cobertura radioeléctrica	27

3.6.1.	Procedimientos de planificación	27
3.6.2.	Criterio de diseño	28
3.6.3.	Antenas	29
3.7.	Ubicación de los emplazamientos	30
3.8.	Resultados de la planificación radioeléctrica	32
3.8.1.	Modelo cartográfico	32
3.8.2.	Modelo de propagación	33
3.8.3.	Configuración de los emplazamientos	34
3.8.4.	Configuración de los parámetros y la paleta de simulación	37
3.8.5.	Niveles de cobertura obtenidos	38
3.9.	Codificación de los emplazamientos	40
3.10.	Listado de emplazamientos	42
3.11.	Plan de frecuencias	43
3.11.1.	Patrón de frecuencias	46
3.11.2.	Asignación de frecuencias	47
3.12.	Estudio de tráfico	48
3.12.1.	Modelo de tráfico	49
3.12.2.	Tipo de tráfico	50
3.12.3.	Características del tráfico	50
3.12.4.	Cálculo del tráfico	51
3.12.5.	Tipo de celdas	51
3.12.6.	Tráfico por celda	52
3.12.7.	Diseño y dimensionamiento del subsistema radio	55
3.13.	Sistema de comunicaciones fijas	60
3.13.1.	Nivel físico	61
3.13.2.	Nivel de transmisión y transporte	63
3.13.3.	Nivel de servicios	63
3.13.4.	Control de la red	64
3.14.	Sistema de Energía	64
3.15.	Plan de obra	65
3.16.	Normativa de aplicación	66
4.	Conclusiones	67

5. Glosario	69
6. Bibliografia	71
7. Anexos	75
7.1. Datasheet antena Kathrein X65	76
7.2. Datasheet antena Kathrein X30	78

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de la línea R11 de los servicios regionales de Cataluña (Fuente:[1]).	1
Figura 2. Mapa de la línea R11 con estaciones.	2
Figura 3. Estación de Maçanet- Massanes (Fuente:[4]).	2
Figura 4. Estación de Cerbere (Fuente:[5]).	3
Figura 5. Tramo de línea Maçanet-Massanes – Cerbère con estaciones.	3
Figura 6. Asignación de frecuencias GSM-R (Fuente:[12])	13
Figura 7. Diagrama de arquitectura del sistema GSM-R (Fuente: [12]).	17
Figura 8. Diagrama topología de red (Fuente: [12]).	23
Figura 9. Cabina de tren cercanías de Renfe (Fuente:[21]).	25
Figura 10. Diagrama de handover entre dos celdas.	26
Figura 11. Diagrama de la antena x65.	29
Figura 12. Diagrama de la antena x30.	30
Figura 13. Trazado con la ubicación de las cabezas remotas y las estaciones base.	31
Figura 14. Perfil de elevación del terreno del trazado completo.	31
Figura 15. Perfil de elevación del terreno del tramo objeto del proyecto.	31
Figura 16. Traza de vía cargada en el software de simulación HTZ.	32
Figura 17. Conversión de la traza de KML a Shapefile en HTZ.	33
Figura 18. Modelos de propagación en HTZ.	33
Figura 19. Traza de vía con emplazamientos HTZ.	34
Figura 20. Traza de vía con emplazamientos HTZ (capa Gesopatial Ortho).	34
Figura 21. Ventana de configuración de emplazamiento.	35
Figura 22. Ventana de configuración de emplazamiento con antena tipo x30.	35
Figura 23. Ventana de configuración de emplazamiento con antena tipo x65.	36
Figura 24. Listado de emplazamientos en HTZ.	36
Figura 25. Parámetros de cobertura en HTZ.	37
Figura 26. Paleta de colores en HTZ.	37
Figura 27. Nivel de potencia obtenido en todo el trazado en HTZ.	38
Figura 28. Nivel de potencia obtenido primer tramo del trazado en HTZ.	39
Figura 29. Nivel de potencia obtenido segundo tramo del trazado en HTZ.	39
Figura 30. Nivel de potencia obtenido último tramo del trazado en HTZ.	40
Figura 31. Nombre emplazamiento tipo BTS.	41

Figura 32. Nombre emplazamiento tipo RRU.	41
Figura 33. Celdas de frecuencias.	46
Figura 34. Diagrama Input de celda.	52
Figura 35. Esquema de Telecomunicaciones fijas (Fuente:[37])	61
Figura 36. Tendido de Fibra Óptica en línea convencional de ADIF Renfe (Fuente[38])	62
Figura 36. Armario transformador reductor en vía (Fuente[39])	64

Lista de Tablas

Tabla 1. Tabla de planificación del trabajo.	7
Tabla 2. Elementos del subsistema NSS	20
Tabla 3. Listado de emplazamientos.	43
Tabla 4. Asignación de frecuencias ARFCN (Fuente:[32]).....	43
Tabla 5. Planificación de interferencias.....	45
Tabla 6. Patrón de frecuencias.....	46
Tabla 7. Asignación de frecuencias.....	48
Tabla 8. Probabilidad de bloqueo interfaces.	50
Tabla 9. Tipo de celdas.	51
Tabla 10. Tráfico en llamadas punto a punto.	54
Tabla 11. Tráfico en llamadas punto a multipunto.....	54
Tabla 12. Tráfico en llamadas para operaciones de maniobra.	54
Tabla 13. Canales necesarios en función del número de portadoras.	55
Tabla 14. Tráfico por emplazamientos.	57
Tabla 15. Distribución de las BTS en subanillos lógicos.	59
Tabla 16. Tráfico de la interfaz ASUB.	60
Tabla 17. Fases plan de obra.....	66

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de la frecuencia ascendente y descendente.	44
Ecuación 2. Cálculo de la Interferencia Total	45
Ecuación 3. Cálculo de Probabilidad de Bloqueo.....	49
Ecuación 4. Cálculo del Tráfico.	51

1. Introducción

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

La línea de ferrocarril R11 de los servicios regionales de Cataluña es una de las rutas ferroviarias más importantes de Cataluña ya que conecta de manera estratégica Barcelona con la provincia de Girona y la frontera francesa, desempeñando un papel fundamental en el transporte de pasajeros. Esta línea operada por Renfe, y anteriormente conocida como línea Ca2 de los Regionales de Renfe en Cataluña, conecta la ciudad de Barcelona con Girona, Figueres, Portbou y Cervera, atravesando localidades como Granollers, Sant Celoni y Maçanet-Massanes. A lo largo de su recorrido, la R11 recorre principalmente la zona prelitoral catalana [1].



Figura 1. Esquema de la línea R11 de los servicios regionales de Cataluña (Fuente:[1]).

El punto de inicio de la línea se encuentra en la estación de Barcelona Sants, aunque los trenes circulan vacíos entre Sants y Bellvitge. Desde Barcelona Sants, los trenes atraviesan el túnel de Passeig de Gràcia, continúan hacia el Clot-Aragó, pasan por la futura estación de La Sagrera y St. Andreu Comtal. Los trenes de la R11 se dirigen hacia Granollers Centre, Sant Celoni y Maçanet-Massanes, donde se puede hacer transbordo con los trenes de la línea de Mataró. El recorrido prosigue por las comarcas gerundenses, pasando por Sils, Caldes de Malavella y Girona. La línea sigue el valle del río Ter hacia Flaçà y luego hacia el norte en busca de la llanura del Empordà hasta Figueres, que sirve como punto final para muchos otros servicios ferroviarios. Algunos servicios de la R11 continúan hacia Llançà y Portbou. Los trenes regionales también llegan a Cervera de la Marenda (Cataluña Norte), donde se pueden conectar con los trenes de la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF), la empresa operadora en Francia. Estos trenes regresan vacíos a Portbou, ya que en dirección sur solo transportan pasajeros los trenes franceses, mientras que en dirección norte lo hacen los trenes catalanes [2].

En la Figura 2, se muestra el trazado completo de la línea R11 y sus estaciones marcadas:

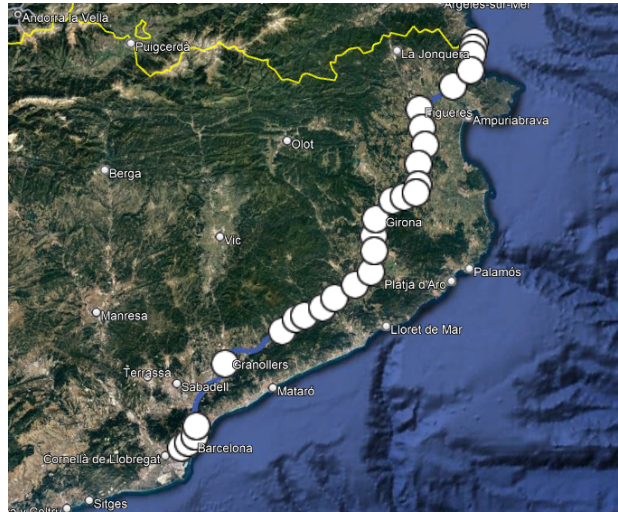


Figura 2. Mapa de la línea R11 con estaciones.

La línea R11 tiene una distancia de 170 km hasta Portbou i 172 km hasta Cervera de la Merenda, con un total de 28 estaciones y una media de 110 circulaciones ida y vuelta en días laborales según los datos que nos proporciona la Generalitat de Catalunya [3].

Nuestra área de estudio abarca el tramo de 85 km que se extiende desde la estación de Maçanet-Massanes hasta la estación de Cervera. La estación de Maçanet-Massanes desempeña un papel importante al ser el punto de confluencia de dos líneas ferroviarias que parten de Barcelona. Por un lado, se encuentra la línea costera R1 de cercanías, y por otro, la línea R2 de cercanías que discurre por el interior. Ambas líneas están bajo la operación de Rodalies de Catalunya de Renfe. La estación se sitúa en el punto kilométrico (PK) 0 del trazado hacia Cervera [2].



Figura 3. Estación de Maçanet- Massanes (Fuente:[4]).

Por su parte, la estación de Cervera se encuentra cerca de la frontera entre Francia y España. Está ubicada en el PK 99,8 de la línea R11, sirviendo como un importante punto de conexión entre las redes ferroviarias de España y Francia. Ofrece servicios de larga distancia, como la línea París - Cervera de la SNCF, así como rutas regionales, como Toulouse - Cervera y Narbona / Nimes / Aviñón - Cervera. Renfe también opera servicios de Media Distancia que conectan Barcelona con Cervera a través de la línea R11. Esta estación desempeña un papel estratégico en el transporte ferroviario entre ambos países [1].

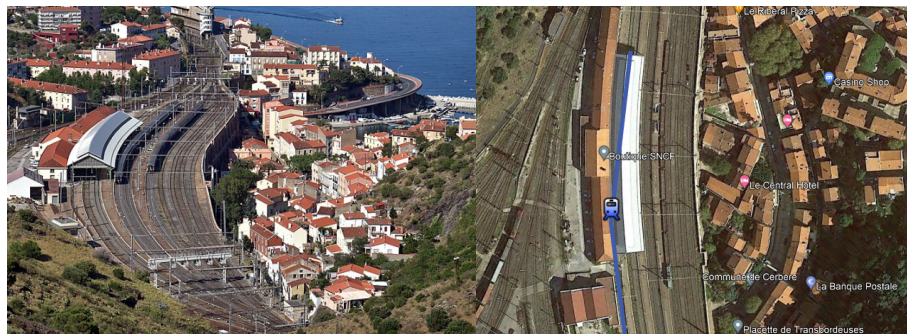


Figura 4. Estación de Cerbere (Fuente:[5]).

En la Figura 5 que se muestra a continuación, se aprecia el tramo entre Maçanet-Massanes y Cervera, que se extiende a lo largo de 85 km e incluye un total de 18 estaciones. En este tramo del trazado de la línea R11 es en el cual vamos a realizar la implementación del sistema GSM-R.

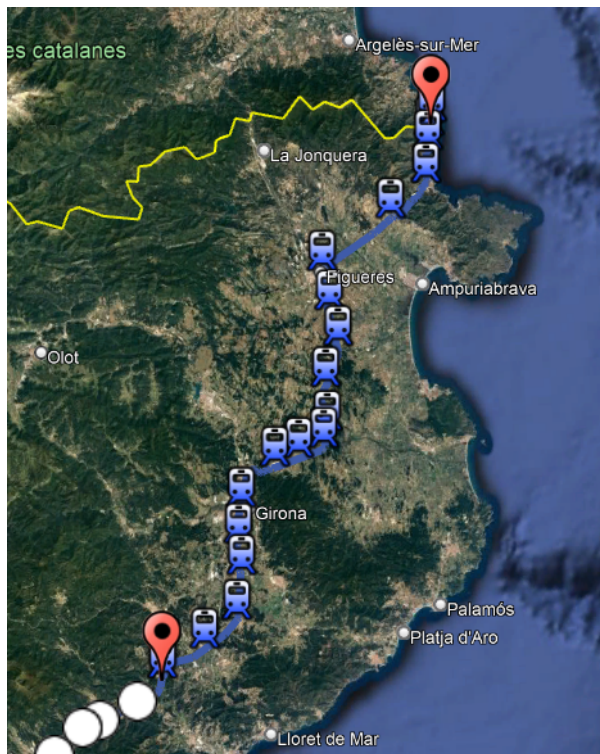


Figura 5. Tramo de línea Maçanet-Massanes – Cerbère con estaciones.

A pesar de su relevancia estratégica, la línea Maçanet-Massanes - Cerbère carece de un sistema de telecomunicaciones móviles GSM-R, lo que representa una limitación considerable en términos de seguridad, eficiencia operativa y capacidad de respuesta en situaciones de emergencia. Es importante destacar que el tramo de R11 hasta Maçanet ya cuenta con el sistema GSM-R, lo que resalta aún más la necesidad de extender esta infraestructura a lo largo de la línea. La motivación detrás de este proyecto está en la necesidad de mejorar la infraestructura de comunicaciones ferroviarias en la sección que no está cubierta. La falta de un sistema GSM-R en este tramo genera desafíos en la coordinación de operaciones ferroviarias, la transmisión de datos y la seguridad en general. En este contexto, el proyecto busca abordar esta carencia mediante una solución efectiva, confiable, robusta y ampliamente implementada que responde a las necesidades del transporte ferroviario. Todo para la renovación de infraestructuras en el marco de Smart Cities como entre otros ejemplos los ya expuestos en [43][47]. También en general para mejorar la movilidad urbana como los objetivos expuestos en TFMs previos [45][46] y concretamente en el ámbito ferroviario [44][48].

La implementación de un sistema GSM-R en esta ruta no solo asegura una comunicación fiable y eficiente, fundamentales para el funcionamiento seguro del ferrocarril, sino que también sienta las bases para futuras mejoras. Entre estas mejoras se encuentra la posibilidad de implementar ERTMS nivel 2 [6], lo que reforzaría aún más la seguridad en la línea y mejoraría la experiencia de viaje de los pasajeros. En definitiva, este proyecto busca abordar un problema relevante en la infraestructura ferroviaria, proporcionando una solución efectiva y estableciendo un camino hacia la modernización continua del sistema.

1.2. Objetivos del Trabajo

El objetivo principal de este proyecto es definir las bases técnicas para la implementación de un sistema de Telecomunicaciones Móviles GSM-R. En este contexto se aborda la especificación del sistema y se define la solución adoptada. La documentación generada proporciona información suficiente para comprender el sistema GSM-R en el tramo objeto del estudio.

Para abordar la implementación del sistema se han establecido los objetivos indicados a continuación:

Diseño y Desarrollo del Sistema GSM-R:

- Realizar el estudio, diseño y desarrollo de un sistema de comunicaciones móviles GSM-R para la línea ferroviaria convencional objeto del proyecto

Definición y Caracterización del Sistema GSM-R:

- Definir la línea de estudio y describir las características y funcionalidades del sistema GSM-R, así como los elementos necesarios para su implementación.

Planificación de la Cobertura y Frecuencias:

- Planificar la cobertura radioeléctrica de la red ferroviaria, asegurando que se cumplan los umbrales de potencia tanto en entornos exteriores como en túneles.
- Establecer un plan de frecuencias para los equipos radio, minimizando interferencias.

Estudio de Tráfico y Eficiencia de Cobertura:

- Realizar un estudio de tráfico, considerando la probabilidad de bloqueo y utilizando la aproximación de la Erlang-B.
- Optimizar la colocación de estaciones base, buscando zonas estratégicas para lograr la máxima eficiencia y cobertura.

Implementación de Comunicaciones Fijas:

- Introducir un sistema de comunicaciones fijas utilizando fibra óptica.

Consumo de Energía:

- Breve descripción del sistema de energía.

Plan de Obra:

- Enumeración del objetivo y las fases del plan de obra.

Cumplimiento de Normativas:

- Estimar las normativas vigentes que deben cumplirse en el proyecto.

1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

El proyecto tiene un impacto positivo en cuanto a la sostenibilidad y contribuye a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [7], definidos en el desarrollo de Smart Cities en el sector de transporte como se analiza en [42]. En esta dimensión, como lo son ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima). La implementación del sistema GSM-R genera un importante ahorro de energía al mejorar la eficiencia operativa y reducir las emisiones de carbono. Esto se debe a que permite una mejor coordinación del tráfico ferroviario, reduciendo los tiempos de espera y la necesidad de detener y reiniciar locomotoras. Esto, a su vez, disminuye el consumo de energía y contribuye a la reducción de la contaminación y las emisiones de carbono. Además, fomenta el uso eficiente de los recursos al reducir la necesidad de fabricar nuevos trenes, lo que ahorra recursos naturales y minimiza el impacto ambiental.

Con respecto a la dimensión de comportamiento ético y de responsabilidad social (RS) no tiene impacto directo negativo en aspectos ético-sociales, ya es un tema técnico y que además no tiene relación con el uso fraudulento del producto o resultados en beneficio

económico, reputacional o de privilegios. Además, no tiene impacto negativo en aspectos normativos o legislativos como datos, privacidad, laboral, propiedad intelectual o seguridad de las personas. Por otro lado, si tiene impactos positivos, ya que contribuye al bien común de la sociedad y genera mejoras y ventajas sociales. La implementación del sistema beneficia tanto a los usuarios como a la sociedad en general, ya que se reduce el riesgo de accidentes y se mejora la gestión del tráfico ferroviario, garantizando un servicio de transporte más seguro y eficiente para todas las personas.

Por último, en la dimensión diversidad, género y derechos humanos el trabajo no tiene un impacto directo en aspectos de género, diversidad (raza, religión, orientación sexual, funcional, etnia, ideología) o derechos humanos. Tampoco afecta directamente a la legislación relacionada con datos, privacidad, laboral, propiedad intelectual o seguridad de las personas, ni a aspectos de accesibilidad, discapacidad, ergonomía o seguridad de los datos y las TIC. El impacto inherente en la solución beneficia a toda la comunidad, independientemente de su género, diversidad o características personales.

1.4. Enfoque y método seguido

El enfoque metodológico elegido para llevar a cabo este proyecto es principalmente analítico, respaldado por la aplicación de los elementos de la investigación. Se realizará un estudio del sistema GSM-R, desde sus inicios hasta la actualidad, estableciendo criterios específicos de aplicación y definiendo la estrategia a seguir. A través de la recopilación de información, se llevará a cabo un análisis detallado de las necesidades, la definición de criterios para el desarrollo y la identificación de requisitos específicos para la implementación. Este enfoque proporcionará una base para el diseño e implementación efectiva del sistema en la línea ferroviaria en consideración.

1.5. Planificación del trabajo

La planificación de las tareas y la duración de las mismas es la mostrada en la Tabla 1:

TAREAS	DURACIÓN
Definición del trabajo (contexto, objetivos, justificación, etc.)	3 semanas
Búsqueda de referencias	1 semana
Estudio de las referencias	3 días
Definición del estado del arte	1 semana
Definición de la solución adoptada (topología, arquitectura, servicios, etc.)	3 semanas
Análisis del trazado de la línea ferroviaria	3 días
Estudios de cobertura radioeléctrica	2 semanas
Elección de emplazamientos	1 semana
Elaboración plan de frecuencias	3 días
Estudio de tráfico	3 días
Sistema de comunicaciones fijas	2 días
Sistema de energía	2 días
Definición de las normativas de aplicación	3 días
Redacción de la memoria	4 semanas
Revisión del trabajo	1 semana

Tabla 1. Tabla de planificación del trabajo.

Palabras clave: GSM-R, Telecomunicaciones móviles, Seguridad ferroviaria, Eficiencia operativa, Modernización ferroviaria, Coordinación ferroviaria, ERTMS, FRMCS.

1.6. Breve resumen de productos obtenidos

En el marco del proyecto se han obtenido los siguientes productos derivados de los objetivos que teníamos propuestos.

Se ha completado el diseño y la planificación para la implementación un sistema GSM-R en la línea ferroviaria convencional.

Se ha formulado un diseño específico para el trazado objeto de estudio definiendo todos los componentes y subsistemas de GSM-R. Este diseño se extiende a lo largo de la ruta cumpliendo con los estándares operativos y de seguridad requeridos, siendo el resultado una solución práctica adaptada a las necesidades de esta ruta.

Se han logrado resultados positivos derivados de la simulación radioeléctrica en toda la extensión de la línea, asegurando una cobertura óptima y la correcta ubicación de todos los elementos radiantes del sistema.

1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

La estructura del proyecto se ha organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1 - Introducción: Este capítulo establece el contexto y la justificación del trabajo. Aquí se exponen los objetivos y la motivación detrás del proyecto, así como el enfoque metodológico adoptado.

Capítulo 2 - Estado del Arte: Se realiza un análisis del sistema GSM-R, desde sus orígenes a su estado actual, así como las proyecciones futuras. En este capítulo también detallan algunas características del sistema que serán fundamentales para los desarrollos presentados en el capítulo siguiente.

Capítulo 3 - Desarrollo: Este capítulo presenta la solución y ejecución del proyecto GSM-R. Comienza con una descripción detallada de los subsistemas y servicios de GSM-R, ilustrando cómo cada uno contribuye al funcionamiento general del sistema. Se analiza la topología de red y se incluye la selección estratégica de emplazamientos para los elementos radiantes, basada en simulaciones de cobertura radioeléctrica realizadas. Se profundiza en la elaboración del plan de frecuencias, elemento importante para la eficiencia y fiabilidad del sistema. Además, se examina el estudio de tráfico, proporcionando una visión completa del flujo y gestión de la comunicación. Finalmente, se detallan los sistemas de comunicaciones fijas y de gestión de energía, elementos importantes en el proyecto.

Capítulo 4 - Conclusiones: Este capítulo sintetiza los resultados del trabajo. Además, se evalúan las posibles líneas de acción futuras y la proyección del trabajo realizado.

Anexos: Incluyen datasheets de las antenas utilizadas en el proyecto, proporcionando información técnica detallada.

2. Estado del arte

En este punto del trabajo se proporcionará un análisis detallado del estado actual de la tecnología GSM-R. Hablaremos del origen del sistema, características técnicas, así como sus limitaciones y su futuro. A través de este análisis, se busca ofrecer una comprensión de cómo el GSM-R ha evolucionado para satisfacer las necesidades específicas de la industria ferroviaria y cómo continúa desempeñando un papel fundamental en la mejora de la seguridad y la eficiencia en el transporte ferroviario.

2.1. Introducción y antecedentes

Las tecnologías de la comunicación desempeñan un papel clave en el sistema ferroviario debido a su extensión, las largas distancias que abarca y la gran movilidad que lo caracteriza. El hecho de tener información precisa y en tiempo real sobre la situación de los trenes, permite operar más trenes en la misma vía, lo que resalta la importancia de las telecomunicaciones para que el rendimiento del transporte ferroviario sea eficiente.

El desarrollo de los ferrocarriles ha conllevado una demanda de mejores comunicaciones, ya que el hecho de tener una comunicación de voz confiable entre el personal ferroviario es un elemento crucial. Recientemente, la señalización continua en cabina se ha vuelto también un elemento muy importante para aumentar la velocidad de los trenes, mejorar la capacidad de las vías y tener una supervisión continua del movimiento de los trenes aumentando la seguridad. Conllevando todo ello a la mejora de la operación ferroviaria, lo que a su vez convierte al tren en una alternativa atractiva para los pasajeros en detrimento de otros medios de transporte [8].

Los operadores ferroviarios, a principios de la década de los 90 [9], decidieron establecer un sistema de comunicación unificado para todo el continente europeo. Esto fue debido a diferentes necesidades, por un lado, los operadores tuvieron que realizar un cambio en su banda de comunicación ya que las licencias de algunas frecuencias habían vencido y no se habían renovado por las autoridades reguladoras locales. De otro lado, el aumento de viajes en tren entre los diferentes países europeos, lo que llevó a intentar simplificar la comunicación entre las entidades de los diferentes operadores y los países. Hasta este momento, cada tren que cruzaba una frontera y operaba en vías de un operador extranjero, debía llevar un sistema de comunicación específico para cada país, ya que no existía interoperabilidad entre los sistemas de los diferentes países.

En ese momento, las comunicaciones entre las operadoras y el personal a bordo de los trenes hacían uso de sistemas analógicos, por lo que se quiso aprovechar este marco como una oportunidad para cambiar a un sistema de comunicación digital. No existía ningún sistema que adaptara las necesidades de todos los operadores ferroviarios de los diferentes

países, y decidieron construir un nuevo sistema basado en un estándar robusto y confiable, utilizado por millones de usuarios como lo era el Global System for Mobile Communications (GSM).

“El GSM es un estándar de telefonía inalámbrica de segunda generación (2G) que se lanzó en 1991 en Finlandia y se convirtió en la tecnología estándar mundial para redes móviles. Introdujo la transición de las telecomunicaciones móviles analógicas a las digitales, permitiendo servicios de datos como SMS y MMS, así como mejoras significativas en la seguridad al encriptar las comunicaciones. A medida que ha avanzado el tiempo, han surgido nuevas generaciones de redes celulares, como 3G, 4G y 5G, para ofrecer mayores velocidades y capacidades de datos para satisfacer las demandas de los usuarios y fabricantes de dispositivos móviles.” [10]

Se decidió entonces adaptar el sistema GSM para satisfacer los requisitos ferroviarios [8]. Estos son:

- **Eficacia demostrada:** Debe contar con un historial exitoso en su operación en redes públicas de comunicaciones móviles.
- **Utilización de componentes estándar:** Deben emplearse componentes estándar de comunicaciones que sean compatibles a los utilizados en el mercado público.
- **Servicios específicos para el ferrocarril:** Debe ofrecer servicios específicos diseñados para el ferrocarril y ser compatible con los sistemas de transmisión por radio actuales.
- **Integración de servicios ferroviarios:** Debe ser capaz de integrar una variedad de servicios ferroviarios en una única red de comunicaciones, mejorando de esta manera la eficiencia.
- **Fiabilidad y disponibilidad:** Debe garantizar un alto nivel de fiabilidad y disponibilidad tanto para voz como para datos.
- **Flexibilidad para nuevos servicios:** Debe ser capaz de facilitar la incorporación de nuevos servicios que puedan definirse en el futuro.

Además, debido a que se estaban basando en un estándar comercial muy popular como lo era el GSM hubo muchos beneficios económicos y de conocimiento. El desarrollo tuvo unos costos significativamente bajos, ya que lo que se estaba haciendo era dotar de unas características específicas al estándar existente sin necesidad de diseñar de cero un nuevo sistema. Además, ya existían especialistas trabajando en GSM, los cuales tenían experiencia en su implementación y operación en redes comerciales [9].

2.2. Evolución de GSM a GSM-R

La transición de GSM a GSM-R requirió de una serie de cambios para satisfacer las necesidades y requisitos de su uso en el contexto ferroviario. Los cambios implementados abordaron diversos aspectos que permitieron la convergencia de esta tecnología de comunicación con las demandas y exigencias específicas del sector ferroviario. Entre las modificaciones más significativas realizadas, destacan las siguientes:

Mayor velocidad de los usuarios: GSM fue diseñado para albergar velocidades de hasta 250 km/h, pero los trenes de alta velocidad operan a velocidades mayores, por lo que se recomendó que el sistema pusiera manejar velocidades de hasta 500 km/h para satisfacer la demanda en todo tipo de trenes [9].

Módulo de llamada en grupo por voz (VGCM), Servicio de Difusión por voz (VBS) y Modo de recepción en Grupo (GRM): Estos cambios permitían comunicar al operador con todos los trenes de una determinada línea al mismo tiempo, siendo algo muy útil para informar sobre eventos específicos o problemas comunes en la ruta. El VGCM permite que las partes que son llamadas respondan, y el VBS y GRM tienen diferentes aplicaciones para la difusión de voz [9].

Prioridad de servicio y prelación: Era necesario priorizar las llamadas según la urgencia, especialmente para señalización ferroviaria. Esto asegura que la información de señalización siempre sea más importante que, por ejemplo, las llamadas de voz o la transferencia de información al cliente (como lo es la compra de un billete) [9].

Direccionamiento funcional y dependiente de la ubicación: Era esencial tener un sistema de direccionamiento que se pudiera adaptar fácilmente al esquema de numeración de los trenes. Esto era necesario porque los trenes se reorganizan para operar cada noche según la capacidad requerida en ciertas conexiones. No había una asignación global de por vida entre coches y locomotoras y la conexión en la que opera este conjunto. Por lo tanto, se requería la capacidad de llegar a un tren específico a través de su número de tren dependiente de la conexión [9].

Capacidad de "Push-to-Talk": Se necesitaba la capacidad de hablar al presionar un botón en el equipo móvil, especialmente para la radio de maniobras y la comunicación móvil a móvil sin interacción con la estación base [9].

Requisitos de seguridad del sistema: Dado que los operadores también acordaron utilizar el Sistema Europeo de Control de Trenes (ETCS), se impusieron importantes requisitos de seguridad en la red. El ETCS reemplaza las señales y brinda información al tren sobre el estado de las vías. Si se produce una interrupción en la comunicación del ETCS, el tren realiza una parada de emergencia. Por lo tanto, la probabilidad de desconexión de llamadas debe mantenerse extremadamente baja, y la mayoría de los operadores buscan una

recepción con una probabilidad del 99.9 % y una probabilidad de cobertura del 95 % en términos de ubicación [9].

2.3. Características técnicas del sistema GSM-R

Debido a que la banda que usaban la mayoría de los sistemas ferroviarios (450/460 MHz) no quedaban frecuencias disponibles, la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) [11] lanzó la propuesta de disponer de una banda de frecuencias común. En el año 1995 el Instituto Europeo de Comunicaciones (ETSI) reservó dos bandas de frecuencia, 876-880 MHz para la banda ascendente desde móvil y 921-925 MHz para la banda descendente hacia el móvil, en Europa para su uso en sistemas de comunicación ferroviaria. Estas bandas de cuatro MHz permiten hasta diecinueve ondas portadoras numeradas del 955 al 973 con una separación de 200 kHz y una banda de guarda en los extremos. Cada una de estas portadoras puede transportar ocho canales para voz y datos, lo que incluye siete canales de comunicación y uno adicional para señalización. Esta asignación de frecuencias fue un paso crucial en el desarrollo del sistema GSM-R para el sector ferroviario.

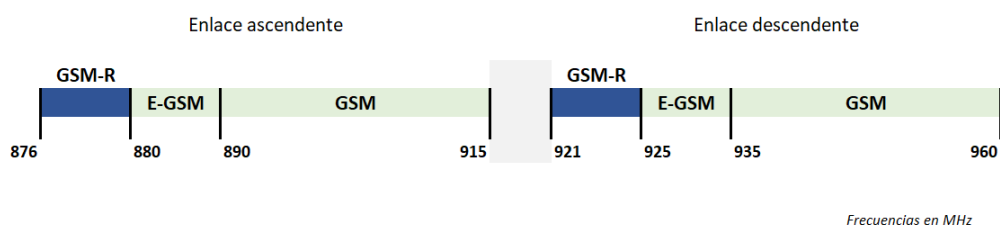


Figura 6. Asignación de frecuencias GSM-R (Fuente:[12])

El sistema GSM-R ofrece la capacidad de establecer comunicaciones entre diversos grupos de usuarios, que incluyen personal de estación, equipos de maniobras, y personal a bordo de los trenes, entre otros. Sus características principales comprenden:

- **Bandas de frecuencias:** El sistema opera en las bandas de frecuencias de 876 – 880 MHz para la comunicación del tren con tierra (uplink) y de 921 – 925 MHz para la comunicación de tierra al tren (downlink).
- **Número de radiocanales:** Dispone de 19 radiocanales, con una separación de 200 kHz entre canales.
- **Modulación GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying):** Utiliza la modulación GMSK, que es una técnica de modulación digital que garantiza una transmisión eficiente y confiable de datos.

Un grupo compuesto por 32 administraciones ferroviarias europeas en el año 1997, que formaban parte de la UIC, se comprometieron de manera conjunta a implementar el sistema GSM-R en sus redes de comunicaciones móviles. Este acuerdo tenía como objetivo asegurar la interoperabilidad en las comunicaciones ferroviarias a través de las fronteras

Actualmente, el sistema GSM-R se encuentra implementado en sistemas ferroviarios en Europa, Norteamérica, China, India, algunas naciones africanas, Australia y Brasil [13].

2.4. Limitaciones y desafíos del sistema GSM-R

Como se ha podido ver, el sistema GSM-R está basado en la tecnología GSM de segunda generación, por lo que actualmente enfrenta desafíos significativos donde resalta su limitación frente a tecnologías de telecomunicaciones más avanzadas. Aunque fue innovador en su época, el GSM-R se ha quedado atrás en comparación con desarrollos recientes como las redes 4G y 5G. Esta obsolescencia tecnológica se manifiesta especialmente en áreas de alta densidad de tráfico ferroviario y en situaciones que requieren una comunicación de datos intensiva, donde la capacidad y eficiencia del GSM-R son insuficientes.

Las diferencias en los principios de señalización y las variaciones en el software de enclavamiento entre distintos países y proveedores plantean desafíos adicionales de interoperabilidad. Esta heterogeneidad complica la adaptación del sistema GSM-R a nuevas tecnologías y estándares, haciendo necesaria su evolución o reemplazo para mantener la eficiencia y seguridad en el sector ferroviario [8] [14].

Además, en el contexto actual, donde la ciberseguridad es una preocupación creciente, es crucial fortalecer la seguridad y resiliencia de las redes ferroviarias. La transición hacia redes más avanzadas, como 5G, ofrece una oportunidad significativa para mejorar la seguridad en comparación con el GSM-R. Esta transición debe incluir una planificación detallada que proteja las infraestructuras críticas y los datos sensibles contra posibles ciberataques. La incorporación de tecnologías 5G en el sector ferroviario no solo abordará las limitaciones de capacidad del GSM-R, sino que también proporcionará mejoras en términos de seguridad y adaptabilidad a las necesidades futuras del sector ferroviario.

Esta adaptación del sistema GSM-R a tecnologías más avanzadas son pasos fundamentales hacia un futuro mejor conectado y más seguro en las comunicaciones ferroviarias. Este proceso representa un desafío significativo pero esencial para el sector, destacando la necesidad de colaboración y planificación estratégica entre los diferentes actores involucrados en las comunicaciones ferroviarias.

2.5. Mejoras y proyectos en curso

Las necesidades de comunicación operativa en el sector ferroviario europeo han sido objeto de una evaluación exhaustiva en los últimos años. En este proceso, se ha llegado a la conclusión de que el sistema GSM-R ha sido desde sus inicios un sistema que garantiza de manera eficaz las necesidades buscadas en una su implementación. Y pese a que estas necesidades evolucionan de manera gradual, el sistema se encuentra en una fase avanzada de su ciclo de vida y en una etapa de transición hacia nuevas tecnologías, lo que abre la puerta a mejoras y proyectos en curso.

Entre los proyectos en curso destaca el sistema Future Railway Mobile Communication System (FRMCS), proyecto lanzado en 2014 por la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) [11], el cual está siendo desarrollado como un estándar basado en 5G diseñado para cubrir todos los casos de uso ferroviarios futuros que requieren un sistema de comunicación móvil. Esto implica no solo un reemplazo del GSM-R, sino también la introducción de nuevas capacidades, como el soporte para el mantenimiento inteligente y la monitorización de componentes a lo largo de la vía. Este cambio permitirá abordar las limitaciones de GSM-R en términos de capacidad, eficiencia y seguridad, y a su vez, introducirá funcionalidades avanzadas para el manejo y operación de ferrocarriles. Se espera que la primera versión estable de FRMCS esté disponible para su adquisición a principios de 2025 [15].

La transición de GSM-R a FRMCS no es solo un cambio tecnológico, sino también un desafío operativo y de infraestructura. Requiere una fase de transición en la que ambos sistemas, GSM-R y FRMCS/5G, deberán funcionar en paralelo, garantizando operaciones continuas y sin interrupciones. Esta transición también implica abordar desafíos como la variedad de sistemas a bordo y la necesidad de capacidades técnicas especializadas para gestionar tanto el GSM-R como los sistemas FRMCS/5G. Mantener la operatividad durante la transición y la implementación de nuevas soluciones que puedan coexistir con las configuraciones actuales es fundamental para una transición sin contratiempos [16].

En términos de capacidad y prioridades, en esta transición a FRMCS es esencial asegurar la disponibilidad y la fiabilidad del enlace de radio, especialmente para las comunicaciones críticas del sistema de control ferroviario. El espectro limitado y las posibles interferencias en áreas congestionadas pueden dificultar la implementación de todos los servicios previstos en la especificación del nuevo sistema. Esto significa que se debe dar prioridad a las comunicaciones críticas, mientras que otros usos pueden tener que esperar una asignación de espectro adicional en diferentes bandas o acuerdos con operadores de redes públicas.

El desarrollo de un sucesor supone desafío complejo, la integración de tecnologías como el 5G en el espectro de frecuencia de GSM-R es un aspecto crucial en esta evolución. Esta migración plantea desafíos únicos como la adaptación de la infraestructura y nuevas demandas. El cambio a un sistema más moderno y la integración de 5G implica una revisión significativa de la infraestructura existente. Esto incluye tanto la actualización del hardware

físico (antenas, estaciones base) como los aspectos de software y protocolos de comunicación. [14].

En conclusión, la evolución del GSM-R hacia un nuevo estándar y la incorporación de nuevas tecnologías como 5G son pasos esenciales hacia un futuro más conectado y eficiente en las comunicaciones ferroviarias. Este proceso no solo mejorará la capacidad y eficiencia del sistema, sino que también garantizará una mayor seguridad y adaptabilidad, preparando el sector para enfrentar los retos y oportunidades del mañana.

3. Desarrollo

En este apartado, se abordará el despliegue de una red GSM-R en una línea ferroviaria convencional. En el transcurso de los siguientes subapartados se detallarán los elementos a tener en cuenta para el desarrollo del proyecto, como los son el plan de frecuencias, la planificación radioeléctrica, estudio de tráfico, etc.

3.1. Solución adoptada

En el proceso de desarrollo del proyecto se ha empleado en todo momento como referencia la Guía Técnica GSM-R de ADIF [17][18], la cual constituye un marco integral para la implementación de GSM-R. Este documento, no solo proporciona las directrices esenciales de diseño, sino también asegura la coherencia con las últimas especificaciones técnicas y funcionales obligatorias, en concordancia con las normas europeas de European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE) [19].

En términos de arquitectura funcional del sistema GSM-R es el mostrado en la Figura 7, donde se detallan sus principales componentes y cómo se interconectan entre sí. Cada uno de estos bloques juega un papel crucial en la prestación de servicios de comunicación ferroviaria y en la gestión y operación de la red GSM-R. Este diagrama es una representación simplificada y conceptual que facilita la comprensión de la estructura y el funcionamiento del sistema.

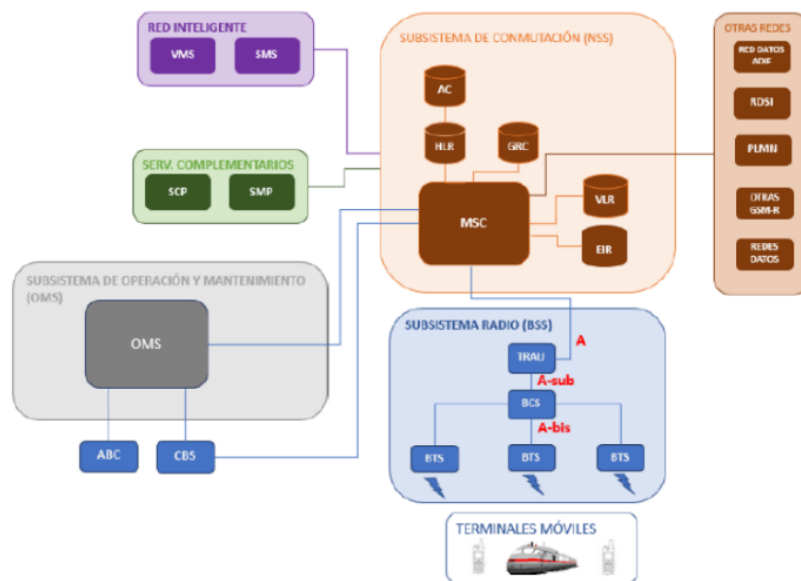


Figura 7. Diagrama de arquitectura del sistema GSM-R (Fuente: [12]).

La arquitectura de la red está compuesta por los siguientes subsistemas:

- **Subsistema de Radio (BSS)**
- **Subsistema de Red y Conmutación (NSS)**
- **Subsistema de Estaciones Móviles (MSS)**
- **Red Inteligente (IN)**
- **Subsistema de Operación y Mantenimiento (OMS)**

En esta sección, se describe el proceso esencial para desarrollar, implementar y desplegar el Sistema Base de Estaciones (BSS) y además se describen el resto de subsistemas. El BSS incluye componentes como estaciones base, unidades de radio remota, controladoras de estaciones base, unidades de transcodificación y adaptación de velocidad de transmisión, dispositivos terminales portátiles, consolas de comunicación y un sistema de supervisión y gestión de radio.

Para el tramo específico de este proyecto, las estaciones base se equiparán con transmisores activos en cantidad determinada según el análisis de tráfico realizado en el apartado Estudio de tráfico, considerando el tipo de celda necesario para cubrir las demandas de comunicación.

Las Controladoras de Estaciones Base (BSC) y las Unidades de Transcodificación/Adaptación de Velocidad de Transmisión (TCU/TRAU) que se conectarán a las estaciones base proporcionarán soporte para todos los canales y servicios de la red, adaptándose a las necesidades de tráfico específicas.

La conectividad entre la BSC y las BTS se llevará a cabo mediante el sistema de telecomunicaciones fijas, siguiendo la topología de red detallada en el apartado de Topología. Se han establecido anillos de conexión de acuerdo con lo especificado en dicho apartado.

3.1.1. Subsistema de Radio (BSS)

La función principal de este subsistema consistirá en posibilitar la comunicación entre las estaciones móviles y la red, desempeñando un papel esencial al proveer todas las funciones necesarias de transmisión y control para garantizar una cobertura radio en el área de servicio.

Este subsistema incluirá los siguiente elementos clave:

- **Estaciones base transceptoras (BTS)**
- **Controladores de estación base (BSC)**
- **Unidad de Transcodificación y Adaptación de Velocidad de Transmisión (TCU/TRAU).**

Para el establecimiento de la infraestructura de GSM-R, se implementará un diseño de estación base distribuidas. Este diseño separa funcionalmente el segmento o módulo de control (SM) y el segmento de transmisión de radio (RRU). Las unidades remotas de radio (RRU) operarán con flexibilidad, ya sea en la misma frecuencia o en distintas, según se requiera para la cobertura efectiva de la red. Estarán vinculadas a un módulo de control centralizado mediante una topología de red en forma de bus, optimizando el uso de las conexiones de fibra óptica disponibles.

Cada RRU, integrada con su respectiva unidad de control (BTS), incorporará algoritmos de equalización que garantizarán comunicaciones de alta calidad, incluso cuando los dispositivos se muevan a velocidades elevadas, lo que es esencial para la dinámica del transporte ferroviario. La modularidad de estos sistemas asegura una integración y expansión ágil en la red, lo que permite actualizaciones de hardware y software sin interrupciones en el servicio.

Además, este subsistema incluirá todos los componentes físicos necesarios para el desarrollo y activación de las estaciones base a lo largo de la infraestructura ferroviaria, como antenas y cableado. La interconexión de estos elementos físicos con el sistema de control centralizado, la BSC permite la gestión efectiva de la señal y el uso eficiente del espectro radioeléctrico.

La BSC, actuando como el cerebro del subsistema de radio, no solo procesa la señal, sino que también administra la comunicación entre las estaciones base y la red de conmutación central. Este control se efectúa a través de protocolos estandarizados, asegurando un tráfico fluido y una supervisión precisa de los recursos de la red.

3.1.2. Subsistema de Red y Conmutación (NSS)

El subsistema de Red y Conmutación tiene un papel muy importante al realizar las funciones de control y enrutamiento de llamadas en la red GSM-R. Los componentes clave que incluirán son los mostrados en la Tabla 2:

Elemento	Descripción
Central de Conmutación de Móviles (MSC)	Es el core del substema, gestiona las conexiones de llamadas, la movilidad de los usuarios y la interconexión con otras redes.
Registro de Localización de Abonados (HLR)	Una base de datos centralizada que contiene detalles permanentes sobre los suscriptores, incluyendo su perfil de servicio y ubicación.
Registro de Localización de Visitantes (VLR)	Almacena información temporal sobre los suscriptores que se encuentran dentro del área de cobertura de un MSC, facilitando la movilidad y la gestión de llamadas.
Centro de Autenticación (AC)	Proporciona los parámetros de seguridad para la autenticación de los usuarios y el cifrado de las comunicaciones.
Registro de Configuraciones para Servicios de Llamadas en Grupo y de Difusión (GCR)	Registro que facilita la implementación de las llamadas en grupo y servicios de difusión permitiendo la comunicación simultánea y coordinada de múltiples usuarios.
Registro de Identificación de Suscripciones (EIR)	Registra la identidad de los dispositivos móviles para prevenir el uso de equipos robados o no autorizados.

Tabla 2. Elementos del subsistema NSS

La MSC, se encargará de gestionar los servicios de control de llamadas, permitiendo la conmutación de conexiones de radio entre estaciones móviles GSM-R, terminales de red fija, y otras estaciones móviles. Presenta interfaces con diversos elementos de la red GSM-R y sistemas externos, como el Sistema BSS, Sistema de Red Inteligente, Plataforma Over-The-Air (OTA) de Gestión de Abonados, Sistema de Centro de Mensajes Cortos y Buzón de Voz, entre otros.

Esta central de conmutación se conecta con las controladoras de estaciones base a través de la interfaz A de GSM y presenta características fundamentales, como una arquitectura modular y escalable, estructura de redundante a nivel físico y lógico, protección contra riesgos de incendio y cortes de suministro eléctrico, y la capacidad de realizar actualizaciones de software y hardware sin interrupciones del servicio.

La interfaz A es la de acceso radioeléctrico entre la estación móvil y la estación base. En este sistema, la Capa A facilita la transferencia de datos entre los equipos de usuario, como dispositivos GSM-R en trenes, y la infraestructura de la red.

3.1.3. Subsistema de Estaciones Móviles (MSS)

Este subsistema englobará los dispositivos esenciales para facilitar la comunicación entre trenes, personal de mantenimiento y operaciones, así como entre estos y el Puesto Central de Mando. Se establecen dos categorías de equipos:

- **Terminales de operación y mantenimiento:** Son dispositivos con similitudes a un teléfono móvil habitual, pero con un sistema más robusto de funcionamiento en cuanto a condiciones medioambientales o mecánicas.
- **Consola de llamadas GSM-R:** Es un terminal que presenta un módulo de audio donde se pueden configurar los parámetros para la gestión de las llamadas entrantes y salientes de la red GSM-R.

3.1.4. Red Inteligente (IN)

La red inteligente realiza la función de capa de control y proporcionará funcionalidades específicas orientadas al ferrocarril a través de un punto de servicio. Entre estas funcionalidades, el servicio de FA (direccionamiento funcional) permite el marcado de números según la actividad de una persona o áreas de trabajo específicas, independientemente de su ubicación actual. El servicio LDA (direccionamiento basado en la localización) facilita el contacto entre el personal del tren y los controladores o jefes de estación responsables del trazado.

Además de estas funciones, la red inteligente cuenta con una infraestructura para servicios suplementarios, como mensajes cortos y buzón de voz. Esto se logra mediante el Servidor de Mensajes Cortos (SMS) y el Servidor de Buzón de Voz (VMS). La monitorización y grabación de llamadas de terminales móviles se gestionan en el centro de monitorización. En situaciones de llamadas de emergencia, se requiere confirmación o asentimiento de que los usuarios involucrados han recibido la llamada. Para la gestión eficiente de usuarios y tarjetas SIM, se utiliza la plataforma OTA.

El sistema GSM-R se apoya en la Red Inteligente para llevar a cabo funciones esenciales, como la Función de Entorno de Creación de Servicio (SCEF) y la Función de Administración y Gestión de Servicio (SMF). Esta integración garantiza que la red cumpla con los requisitos necesarios para el entorno ferroviario, proporcionando servicios eficientes y seguros.

3.1.5. Subsistema de Operación y Mantenimiento (OMS)

Dentro de este subsistema encontramos el equipamiento para el control y la supervisión del sistema GSM-R y los equipos asociados. Está dividido en cinco bloques esenciales:

- Gestión del subsistema de conmutación OMC-S.
- Gestión del subsistema de estaciones base OMC-R.
- Gestión del sistema de energía de GSM-R.
- Gestión de alarmas externas asociadas a las casetas GSM-R.

La topología habitual es un diseño cliente-servidor. Incorpora sistemas de supervisión dedicados a la gestión del subsistema de conmutación, los componentes del subsistema BSS, los equipos de energía en todos los emplazamientos, y la red de unidades remotas, permitiendo un monitoreo integral. La conectividad constante a un sistema de alimentación ininterrumpida asegura la continuidad del servicio. Los interfaces de gestión están desarrollados conforme al proyecto MORANE [20], estableciendo requisitos específicos para los sistemas de comunicación ferroviarios. Además, la controladora está equipada con medios de impresión adecuados para facilitar las operaciones y mantenimiento.

3.2. Topología

Se implementará una configuración de estaciones base distribuidas que consta de dos elementos principales: el Módulo de Control de Sistema de BTS distribuida (MS) encargado de las funciones de control y comunicación, y la Cabeza Radio Remota GSM-R (RRU) que se encarga de las operaciones radiantes. Cada estación base se compone de estos componentes junto con el Sistema Radiante.

En la Figura 8 se ilustra la topología de red adoptada, destacando la integración de equipos de radio remotos y módulos de conmutación conectados a través de una infraestructura de red que incluye tanto cableado de red LAN como fibra óptica. Los elementos están interconectados en una topología que facilita el flujo de datos entre los puntos de acceso de radio en las casetas y armarios, y se gestionan centralmente a través de un controlador de estación base. Esta configuración es vital para el funcionamiento y la gestión eficiente de la red de comunicaciones. La nube IP representa la red a la que todos estos elementos están conectados para la transmisión de datos.

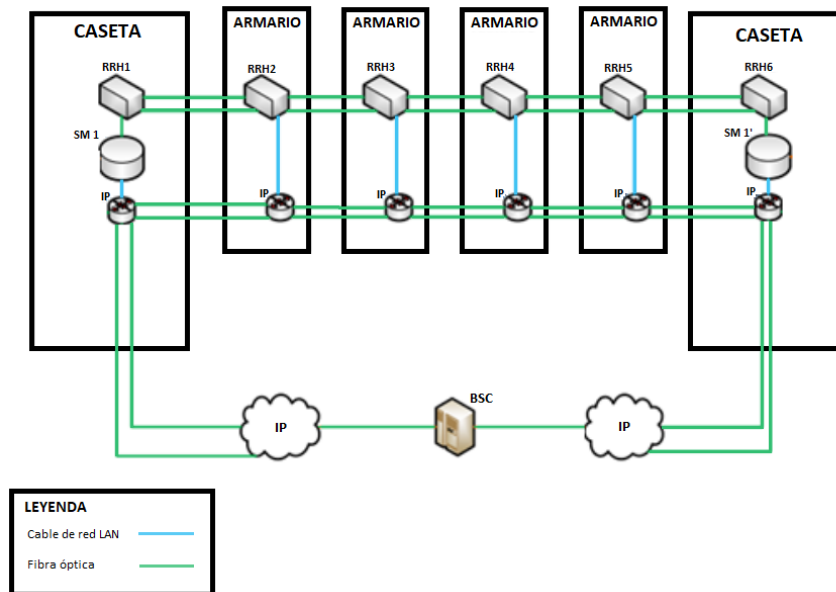


Figura 8. Diagrama topología de red (Fuente: [12]).

Las estaciones base transceptoras (BTS) y las unidades remotas (RRU) se distribuirán de manera adecuada a lo largo del trazado para garantizar la cobertura necesaria y asegurar el correcto funcionamiento de los servicios requeridos

3.3. Servicios

Los servicios que tendrá la red GSM-R diseñada serán como los de una red de radiotelefonía móvil privada, pero en este caso para un uso ferroviario. Los servicios serán:

- Servicio de Voz
- Servicio de Datos
- Equipos Móviles
- Radio en Cabina

Además, la red ofrecerá soporte a los siguientes servicios:

- **Radiotelefonía móvil general:** Utilizada para la comunicación entre el puesto de control y los conductores, dando un soporte continuado y centralizado del tren. Además, también permite establecer comunicación entre conductores de trenes distintos o con el personal de estaciones.
- **Radiotelefonía móvil para maniobra y mantenimiento:** Utilizada en la realización de maniobras de los trenes o cuando se realicen trabajos de mantenimiento.
- **Radiotelefonía móvil para para vigilancia y seguridad:** Utilizada por el equipo de seguridad.

- **Radiotelefonía móvil para gestión:** Utilizada para la comunicación con el exterior del servicio ferroviario.

3.3.1. Servicio de Voz

El servicio de voz de GSM-R permite realizar diferentes tipos de llamadas de voz, como lo son las llamadas de voz punto a punto, de emergencia, de difusión, de grupo y multiconferencia.

En las llamadas de difusión o llamadas de grupo, se podrá especificar la zona de cobertura de dichas llamadas, detallando la ubicación del emisor si proviene de un terminal móvil. Además, se identificará el grupo destinatario de la llamada, como todos los usuarios en un área específica o todos los trenes, entre otros. En el caso de llamadas desde un terminal de red fija, se indicará el prefijo identificativo del grupo y su área de localización. Este enfoque proporciona flexibilidad y precisión en la gestión de comunicaciones en grupo.

Además de esto, existen una serie de servicios suplementarios y específicos de uso ferroviario asociados a este servicio.

3.3.2. Servicio de Datos

La red GSM-R también ofrecerá servicios de datos para satisfacer las necesidades de comunicación. Esto incluirá mensajes de texto con opciones tanto de envío como de recepción, ya sea de forma individual o para difusión en una celda específica. Además, la red admitirá aplicaciones de datos genéricas, facilitando el envío de mensajes de texto y la comunicación de datos, con velocidades que oscilan entre 2,4 kbps y 9,6 kbps.

3.3.3. Equipos Móviles

A continuación, se especifican los principales tipos de terminales móviles, cada uno diseñado para funciones específicas y adaptado a diferentes entornos operativos:

- **Radio en cabina:** Incorporada en los trenes y destinada al uso exclusivo del conductor.
- **Portátil de propósito general:** Diseñado para el personal general de la línea ferroviaria.
- **Portátil operacional:** Destinado al personal de la línea encargado de operaciones de mantenimiento de la vía o maniobras, proporcionando una solución específica para sus necesidades operativas.

3.3.4. Radio en Cabina

El terminal de cabina estará equipado con un Sistema de Radio de Voz GSM-R, con la posibilidad de expansión a un Sistema de Radio de Datos. Esta configuración posibilitará la comunicación de voz entre el conductor del tren y el personal de la estación, así como con el sistema de megafonía del propio tren, asegurando un sistema integral de comunicación adaptado a las necesidades operativas. En la Figura 9 se puede ver la cabina de un tren de cercanías de Renfe



Figura 9. Cabina de tren cercanías de Renfe (Fuente:[21])

3.4. Parámetros de calidad del servicio

Para que el sistema GSM-R que aplicamos sea aceptado y conforme a las normativas vigentes, realizaremos la revisión de los siguientes parámetros:

Establecimiento unos umbrales mínimos de cobertura para la planificación radioeléctrica expresados como valores mínimos de potencia. Estos umbrales vienen definidos en la guía técnica de GSM-R[17][18]. Estos parámetros serán esenciales para garantizar una cobertura efectiva en todos los entornos. Los límites establecidos son:

- - 85 dBm para áreas al aire libre
- - 70 dBm para zonas de interior de túneles

Comprobación de handovers para asegurar la transición fluida entre celdas.

Revisión de las normativas para evaluar y garantizar la calidad del servicio según EIRENE [19] y MORANE [20].

Es importante destacar que, en la implementación real del sistema, se llevarán a cabo pruebas adicionales para asegurar la calidad del servicio, incluyendo aspectos como:

- El tiempo de conexión
- La probabilidad de no establecimiento de la conexión
- La probabilidad de desconexión
- El retardo en la transmisión
- La probabilidad de fallo de datos
- El tiempo de registro en la red GSM-R

3.5. Handover

El handover se define como el sistema encargado de facilitar la transferencia del servicio desde una estación base a otra cuando la calidad del enlace se torna insuficiente. Este mecanismo desempeña un papel crucial al asegurar que los dispositivos, al desplazarse de un lugar a otro, no experimente pérdida de conexión con ninguna estación base, evitando así la pérdida de cobertura. El proceso de handover implica la transición de una llamada de una celda a otra, con el objetivo primordial de maximizar la calidad de transmisión en ambos canales, ascendente y descendente. Cuando el nivel de potencia recibido por un terminal desde una estación base disminuye a niveles inaceptables, afectando la calidad de la conexión, se desencadena el proceso de handover. En este contexto, el terminal se sincroniza con la siguiente estación base que ofrece una señal más potente, permitiendo así la continuación de la llamada sin interrupciones. En el ámbito ferroviario, este procedimiento opera eficientemente a diversas velocidades, incluso hasta 500 km/h.

La Figura 10 ilustra un handover ferroviario, mostrando un tren que transita entre dos estaciones base. Este proceso asegura que la comunicación se mantenga sin interrupciones al cambiar de la señal de una estación a otra.

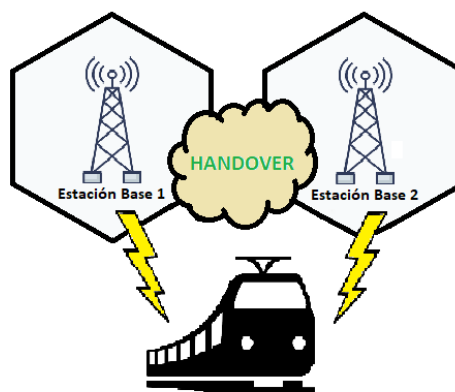


Figura 10. Diagrama de handover entre dos celdas.

Para garantizar la continuidad del servicio, se establecerán parámetros clave, como una tasa de procesos de handover logrados superior al 99,5% y un tiempo de procesamiento máximo inferior a 300 ms. Estos criterios son fundamentales para evitar interrupciones en las llamadas y asegurar los estándares de calidad necesarios en el sistema de comunicaciones móviles [22].

Además, para una transición eficiente entre celdas en redes de comunicación móvil, es crucial establecer un área de solapamiento adecuado que asegure la continuidad del servicio durante el handover y la re-selección de celda. Esta zona de solapamiento se define basándose en el tiempo que requiere el terminal móvil para completar la transferencia de llamada y el proceso de re-selección. Tal y como hemos visto, el handover debe ser rápido, inferior a 300ms, mientras que la re-selección de celda puede requerir hasta 12 segundos. Tomando en cuenta las velocidades de desplazamiento, se calcula un solapamiento de 400 a 733 metros para mantener la comunicación efectiva. La planificación de la red debe asegurar este solapamiento con un nivel de señal adecuado, generalmente no inferior a -92dBm, para garantizar la calidad del servicio incluso a máxima velocidad y en distintos sentidos de tráfico.

3.6. Cobertura radioeléctrica

En este apartado se define el plan de cobertura radioeléctrica para la solución que hemos adoptado en el tramo de vía que abordamos en nuestro proyecto, estableciendo criterios de diseño y parámetros esenciales. Se presenta la metodología aplicada y los cálculos realizados a través de la planificación radio GSM-R.

El alcance de la planificación radioeléctrica abarca desde la estación de Maçanet-Massanes hasta el final de la vía R11 en Cerbere.

3.6.1. Procedimientos de planificación

A continuación, se detalla la metodología seguida para la realización de la planificación radioeléctrica.

Replanteo físico del recorrido:

- Realización de replanteos físicos a lo largo del recorrido para obtener un conocimiento detallado del trazado.
- Identificación de posibles emplazamientos o áreas propicias para la instalación de emplazamientos GSM-R.

Uso de mapas digitales y herramientas de planificación:

- Integración de mapas digitales complementarios con los datos recopilados en las visitas de campo.
- Empleo de herramientas de planificación radioeléctrica para realizar predicciones de diseño.

Configuración de los parámetros en la herramienta:

- Introducción de la lista de emplazamientos en la herramienta de planificación.
- Configuración de parámetros esenciales como tipos de antenas, altura de torres o mástiles, azimut, etc.

Simulaciones y análisis de los resultados:

- Ejecución de simulaciones utilizando los datos configurados en la herramienta.
- Análisis de los resultados obtenidos.

Ajuste de parámetros:

- Evaluación de los resultados de las simulaciones.
- Ajuste de parámetros según sea necesario para lograr una cobertura óptima que cumpla con los requisitos establecidos.

3.6.2. Criterio de diseño

En el marco del criterio del diseño radioeléctrico existen desafíos que debemos tener en cuenta cuando se consideran factores topográficos o estructurales que pueden afectar a la propagación de la señal. Los niveles de potencia requeridos se pueden alcanzar de una manera efectiva cuando la línea de visión es directa entre las antenas. Debido a que durante el trazado podremos encontrar zonas con algún tipo de obstáculo de propagación (edificios, masas forestales, cambios en el terreno, etc.) deberemos hacer uso de herramientas de cálculo de propagación radioeléctrica.

Con el fin de realizar una predicción precisa del diseño radioeléctrico con estos condicionantes, vamos a hacer uso de la herramienta de cálculo de propagación radioeléctrica HTZ [23], la cual utiliza modelos digitales del entorno. En este caso, haremos uso de modelos digitales de elevaciones LiDAR [24]. Estos modelos cuentan con precisión altimétrica y muy buena resolución espacial y reflejan con precisión los obstáculos potenciales en la propagación radioeléctrica.

Además, con el fin de evaluar la propagación de una forma adecuada, emplearemos el modelo de propagación de Okumura-Hata [25] y la recomendación 526 del UIT-R [26] como comprobación adicional a los cálculos basados en el método de Okumura-Hata [25].

La estrategia adoptada para el diseño radioeléctrico implica la implementación de estaciones base con cabezas remota que estarán distribuidas a lo largo de todo el trazado de la vía ferroviaria. Estas cabezas remotas estarán interconectadas mediante fibras ópticas.

Siguiendo las recomendaciones de EIRENE [19] se establece que los requerimientos de cobertura de - 85 dBm para áreas al aire libre y - 70 dBm para zonas de interior de túneles, ya citados en el apartado 3.3 Parámetros de calidad del servicio, deben cumplirse al menos el 95% del tiempo sobre el 95% del área de cobertura radioeléctrica.

Se han posicionado estratégicamente antenas en estaciones base nodales y remotas, orientadas en cada sentido de la vía. La disposición de estas antenas, combinada de manera eficiente busca asegurar una conectividad sólida y continua a lo largo del recorrido. Este diseño tiene como objetivo prevenir interrupciones innecesarias en la comunicación, garantizando así una experiencia fluida para los usuarios de la red GSM-R.

3.6.3. Antenas

Las antenas que emplearemos tienen una polarización cruzada, lo que implica que reciben alimentación del mismo transceptor, y cada una posee una polarización específica al recibir y transmitir. Esta disposición reduce considerablemente las posibilidades de interferencia entre ellas. Es crucial destacar que estas antenas deben operar dentro de las bandas de frecuencia designadas para GSM-R.

Haremos uso de dos modelos distintos de antena utilizadas en el ámbito ferroviario, el modelo x65 y el x30 del fabricante Kathrein [27]. Las características de ambas se muestran a continuación, y, además, se incluyen la Figura 11 y Figura 12 donde se muestran los diagramas polares que representan las características de radiación de las antenas. Los diagramas con un patrón de radiación con lóbulo más amplio, indican una radiación más dispersa, mientras que los diagramas con lóbulo principal más estrecho sugieren un haz enfocado y una mayor ganancia en la dirección de ese haz.

Módulo Kathrein x65 [28]

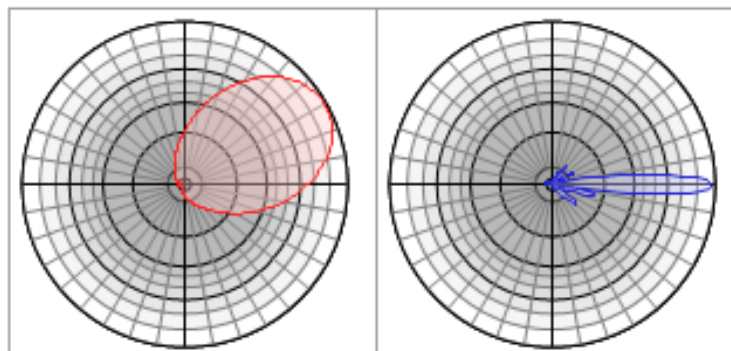


Figura 11. Diagrama de la antena x65.

Esta antena tiene las siguientes características:

- Polarización: Cruzada
- Haz horizontal: 65°

- Haz vertical: 10°
- Ganancia: hasta 17dB

Módulo Kathrein x30 [29]

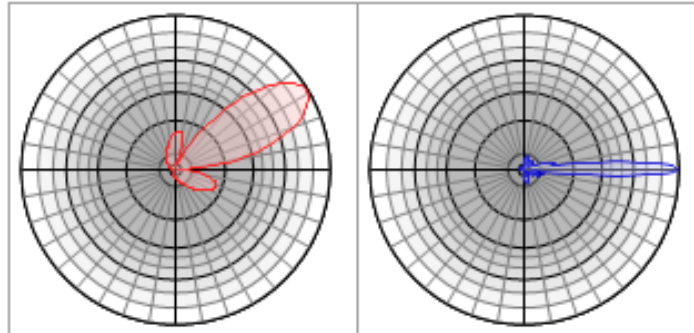


Figura 12. Diagrama de la antena x30.

Esta antena tiene las siguientes características:

- Polarización: Cruzada
- Haz horizontal: 30°
- Haz vertical: 7°
- Ganancia: hasta 21dB

Debido a las características de las antenas, haremos uso de la antena x65 [28] en aquellos tramos donde el terreno sea más curvo y presente curvaturas. La antena x30 [29], debido a que es más directiva, haremos uso de ella en tramos donde el terreno sea más recto.

3.7. Ubicación de los emplazamientos

En este punto vamos a analizar las características del tramo de línea donde vamos a implementar el sistema GSM-R el cual va desde Maçanet-Massanes hasta la estación de Cervera, con aproximadamente 85km de recorrido.

En la Figura 13 se puede ver el tramo de vía en el cual realizaremos la implementación en el que se basa el estudio radioeléctrico. Podemos diferenciar entre los distintos equipamientos de radio (RRU y BTS) ubicados a lo largo del trazado.

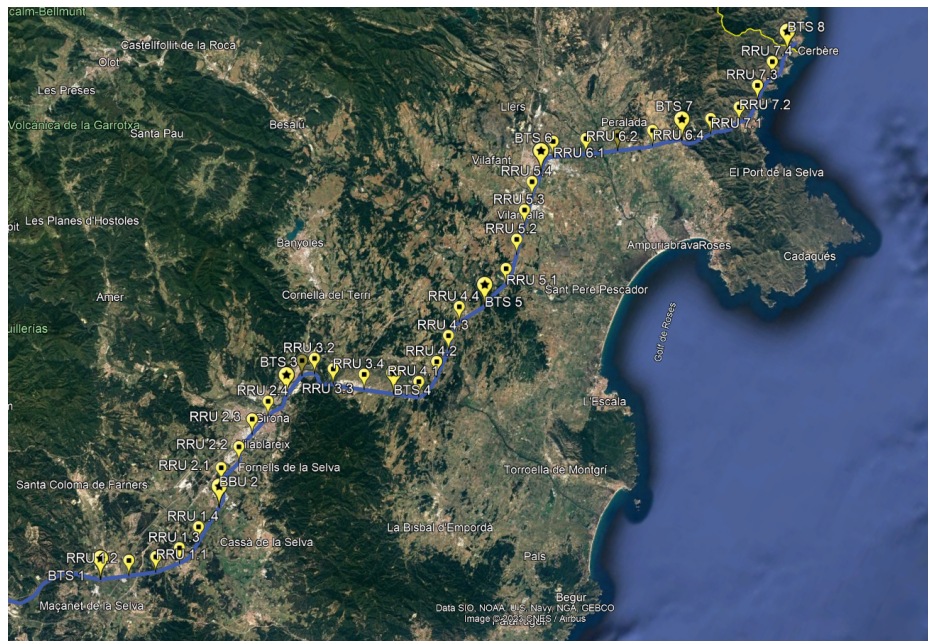


Figura 13. Trazado con la ubicación de las cabezas remotas y las estaciones base.

A continuación, en la Figura 14 y la Figura 15, se muestra el perfil de elevación del terreno. Este perfil de elevación es de la línea R11 completa, en nuestro caso, el estudio comienza aproximadamente en el kilómetro 94:



Figura 14. Perfil de elevación del terreno del trazado completo.



Figura 15. Perfil de elevación del terreno del tramo objeto del proyecto.

Tal y como se puede apreciar el trazado presenta un perfil de elevación diverso a lo largo de su recorrido. El tramo objeto de estudio inicia su travesía en una elevación aproximada de

90 metros sobre el nivel del mar, estableciendo un punto de partida a una altitud relativamente baja. A medida que avanza, la línea experimenta un ascenso gradual hasta alcanzar su cota máxima de alrededor de 250 metros.

Durante su trayecto, la línea atraviesa diversas características geográficas, áreas boscosas, zonas urbanas como algunas ciudad y poblaciones locales. Finalmente, la línea desciende hasta nivel del mar al llegar a Portbou y Cervera.

3.8. Resultados de la planificación radioeléctrica

En este apartado vamos a mostrar el desarrollo de la implementación radioeléctrica en el software de simulación HTZ [23]. En los siguientes apartados mostraremos la configuración de las simulaciones y los resultados obtenidos.

3.8.1. Modelo cartográfico

Se han cargado los mapas de modelos digitales de la zona en la cual vamos a realizar las simulaciones. Estos mapas identifican los diferentes tipos de terreno que nos encontramos a lo largo del recorrido (bosques, ríos, ciudades, etc.) así como la elevación. Esta información es de gran relevancia para definir las posibles atenuaciones.

En la Figura 16 se muestra el mapa de la zona cargado en el simulador con la traza de vía ya importada:

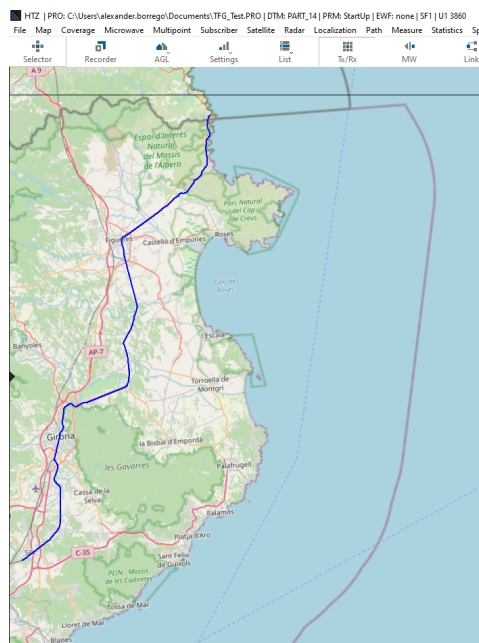


Figura 16. Traza de vía cargada en el software de simulación HTZ.

Para la importación de la traza de vía del tramo donde se realizará la simulación radioeléctrica se ha exportado desde Google Earth un archivo kml y se ha convertido el vector a un formato importable en HTZ [23], en este caso Shapefile. En la Figura 17 se puede ver la pantalla de este procedimiento en el software de simulación.

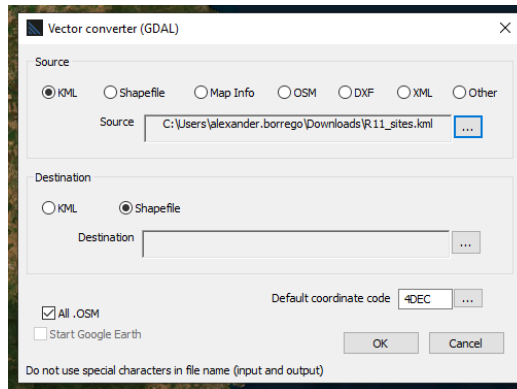


Figura 17. Conversión de la traza de KML a Shapefile en HTZ.

3.8.2. Modelo de propagación

Como paso previo a realizar la simulación se ha configurado el modelo de propagación. Tal y como ya se ha mencionado en el apartado de Criterio de diseño donde se establecen los criterios de diseño, utilizaremos el modelo de propagación de Okumura-Hata [25] y la recomendación del UIT-R 526 [26]. Estos modelos ya vienen definidos en el software de simulación. En la Figura 18 se puede ver como se establecen los parámetros de configuración del modelo de propagación en el software.

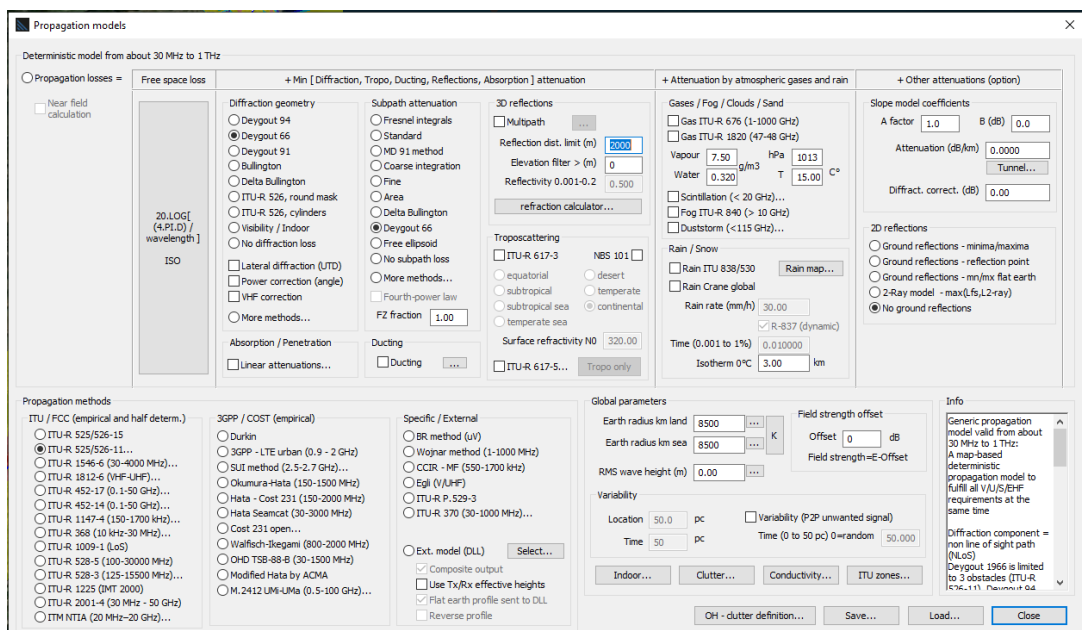


Figura 18. Modelos de propagación en HTZ.

3.8.3. Configuración de los emplazamientos

En este apartado se muestra como se ha realizado la configuración de los diferentes emplazamientos ubicados a lo largo de la traza de vía. En la Figura 19 se puede ver el mapa, con el vector de la vía y los emplazamientos ya ubicados con la misma disposición que en se mencionó en el apartado de Ubicación de los emplazamientos. En la Figura 20 se puede apreciar lo mismo, pero con una capa distinta, donde se aprecia el relieve del terreno.

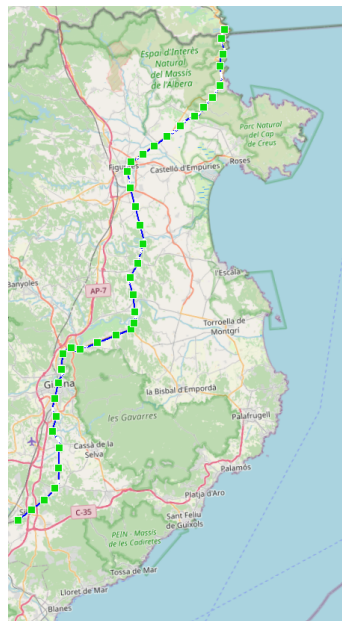


Figura 19. Traza de vía con emplazamientos HTZ.



Figura 20. Traza de vía con emplazamientos HTZ (capa Gesopatial Ortho).

Por cada uno de los emplazamientos se han establecido dos antenas que se orientan en ambas direcciones de la vía. Dentro de cada uno de estos emplazamientos se han configurado diferentes elementos que se detallan a continuación y que se pueden apreciar en las siguientes figuras del software de simulación.

Nombre del emplazamiento, altura y frecuencia:

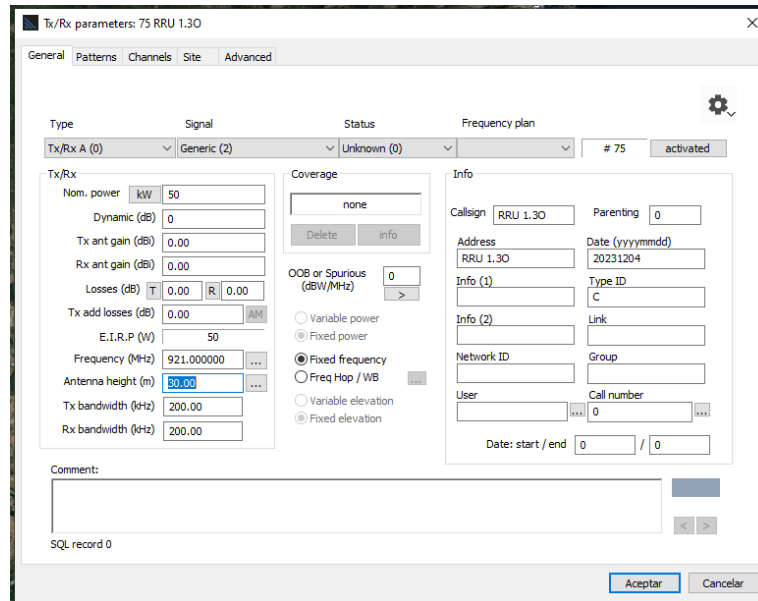


Figura 21. Ventana de configuración de emplazamiento.

Tipo de antena a utilizar (x65 o x30):

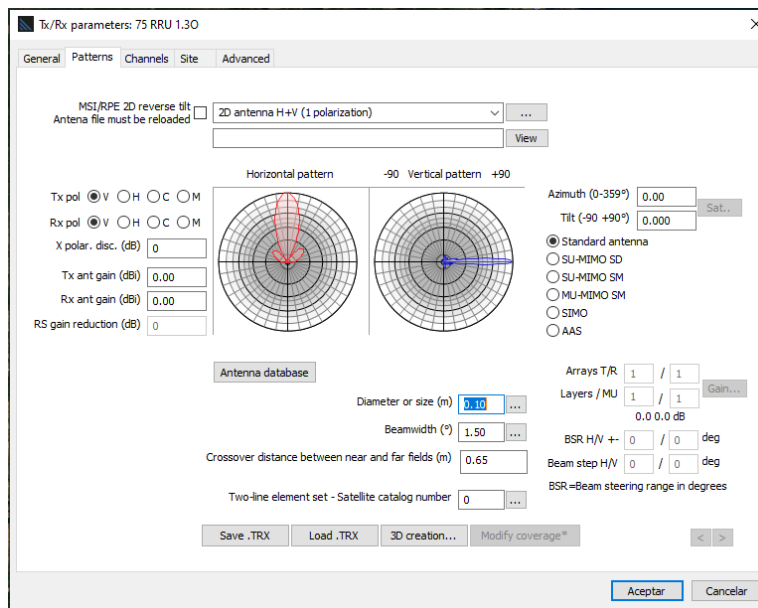


Figura 22. Ventana de configuración de emplazamiento con antena tipo x30.

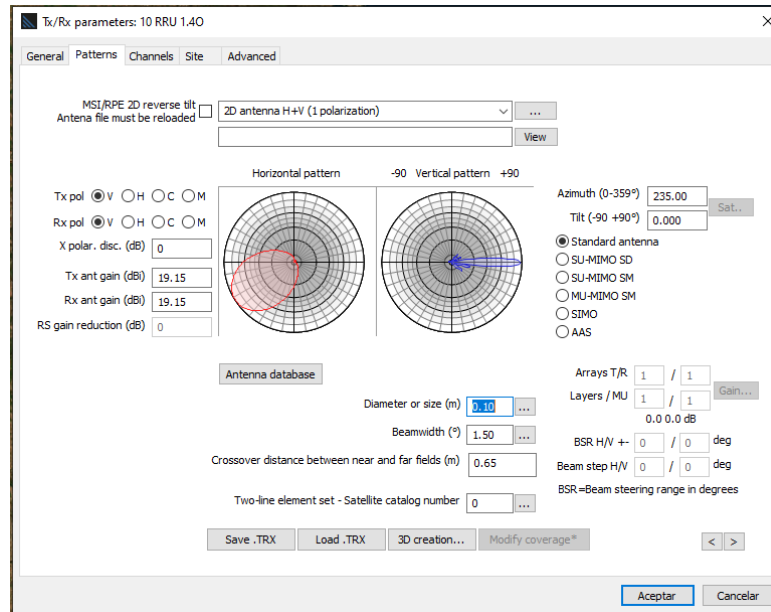


Figura 23. Ventana de configuración de emplazamiento con antena tipo x65.

Una vez configurados todos los emplazamientos, obtendremos una lista como la mostrada en la Figura 24 en el software de simulación:

Record	Callsign	Address	Frequency (MHz)	Nominal power (W)	Radiated power (W)	Antenna (m)	Type	Switch	Cover
1	BTS 1E	BTS1	876	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
2	BTS 1O	BTS1	921	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	5 m
3	RRU 1.1E	RRU 1.1	876.4	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
4	RRU 1.1O	RRU 1.1	921.4	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
5	RRU 1.2E	RRU 1.2	876.8	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
6	RRU 1.2O	RRU 1.2	921.8	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
7	RRU 1.3E	RRU 1.3	877.2	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
8	RRU 1.3O	RRU 1.3	922.2	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
9	BTS 2E	BTS 2	878	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
10	BTS 2O	BTS 2	923	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
11	RRU 2.1E	RRU 2.1	878.4	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
12	RRU 2.1O	RRU 2.1	923.4	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
13	RRU 2.2E	RRU 2.2	878.8	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
14	RRU 2.2O	RRU 2.2	923.8	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
15	RRU 2.3E	RRU 2.3	879.2	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
16	RRU 2.3O	RRU 2.3	924.2	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
17	RRU 2.4E	RRU 2.4	876	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
18	RRU 2.4O	RRU 2.4	921	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	5 m
19	BTS 3E	BTS 3	876.4	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
20	BTS 3O	BTS 3	921.4	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
21	RRU 3.1E	RRU 3.1	876.8	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
22	RRU 3.1O	RRU 3.1E	921.8	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
23	RRU 3.2E	RRU 3.2	877.2	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
24	RRU 3.2O	RRU 3.2	922.2	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
25	RRU 3.3E	RRU 3.3	877.6	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
26	RRU 3.3O	RRU 3.3	922.6	50	13.000796674	35.00	T/R A	activated	N
27	RRU 3.4E	RRU 3.4	878	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N
28	RRU 3.4O	RRU 3.4	923	50	32.656524764	35.00	T/R A	activated	N

Figura 24. Listado de emplazamientos en HTZ.

3.8.4. Configuración de los parámetros y la paleta de simulación

El último paso previo a la simulación es la configuración de los parámetros que se establecerán para la simulación. Como se puede apreciar en Figura 25, podemos configurar la altura de las antenas receptoras de los trenes, en este caso las ubicamos a aproximadamente 4 metros, y la distancia de simulación de un rango de 3km, ya que esta es la distancia aproximada donde ubicamos los emplazamientos.

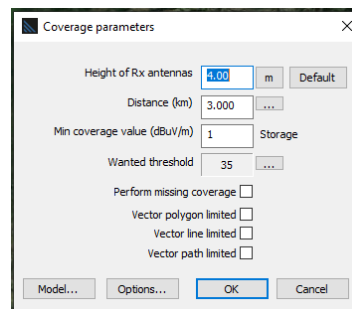


Figura 25. Parámetros de cobertura en HTZ.

Para tener una interpretación más clara de los resultados, configuraremos una paleta de colores donde se identifican los rangos de cobertura. En la Figura 26 se muestra dichos rangos.

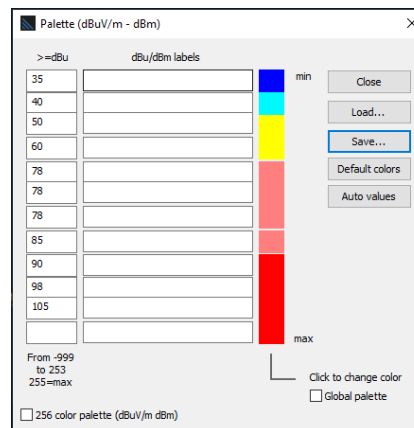


Figura 26. Paleta de colores en HTZ.

3.8.5. Niveles de cobertura obtenidos

A continuación, mostraremos los resultados de la planificación radioeléctrica, donde se aprecian las áreas coloreadas a lo largo de la ruta las cuales representan las diferentes intensidades de señal, medidas en dBm, donde el objetivo es mantener la señal por encima de -85 dBm al aire libre y -70 dBm en túnel.

Se puede apreciar en las siguientes figuras los resultados obtenidos mediante el software de simulación:



Figura 27. Nivel de potencia obtenido en todo el trazado en HTZ.

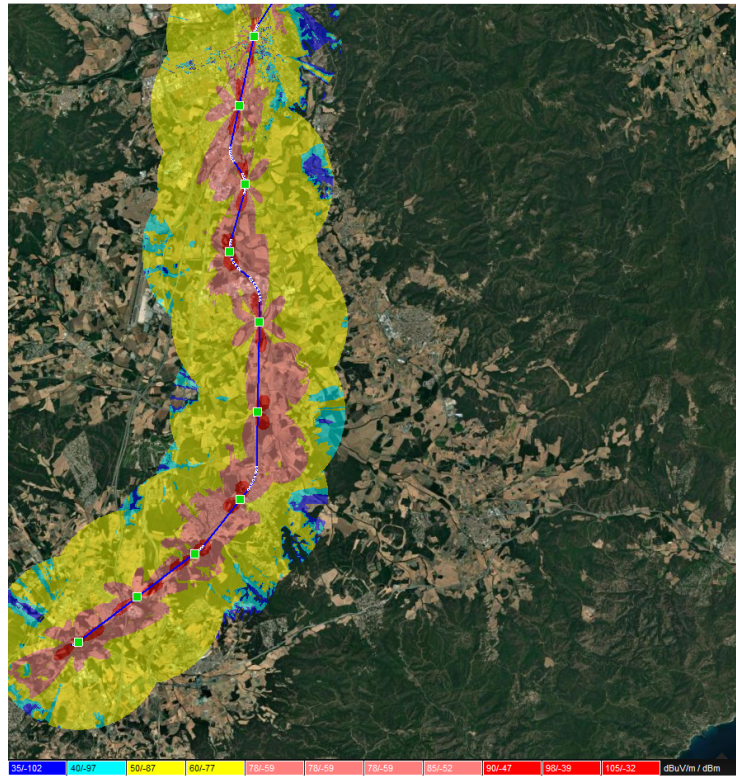


Figura 28. Nivel de potencia obtenido primer tramo del trazado en HTZ.

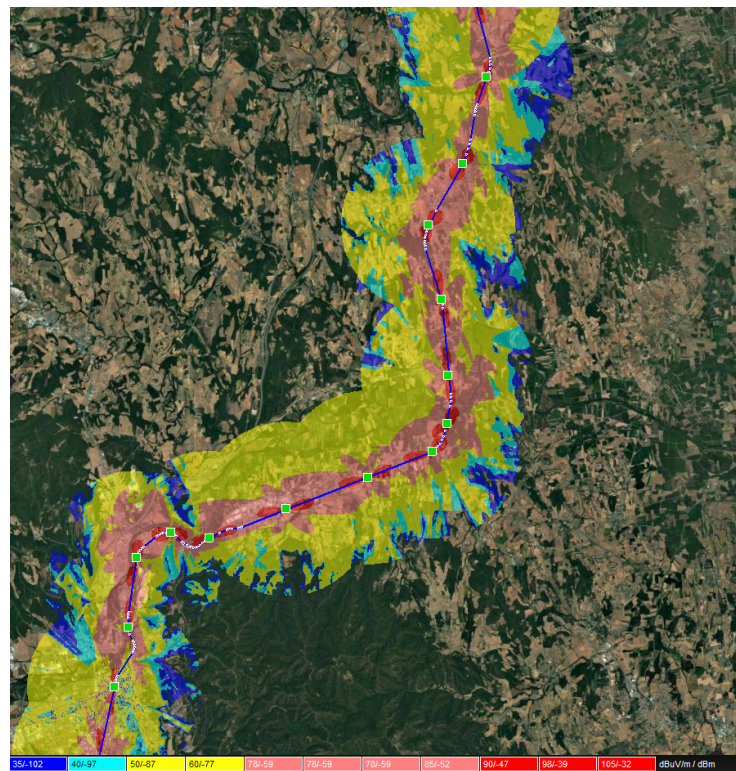


Figura 29. Nivel de potencia obtenido segundo tramo del trazado en HTZ.

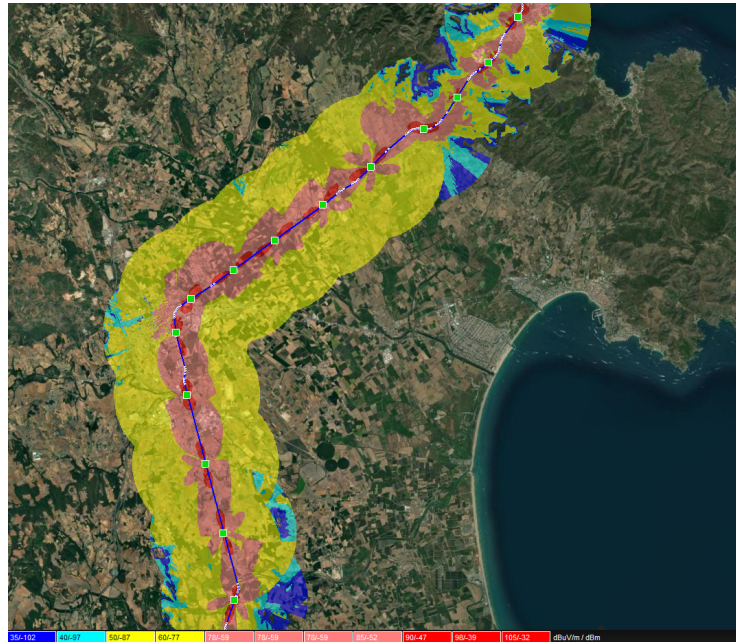


Figura 30. Nivel de potencia obtenido último tramo del trazado en HTZ.

La simulación radioeléctrica reflejada en las figuras mostradas previamente indica que los niveles de señal cumplen con los requisitos y se mantiene por encima de los valores establecidos en los criterios de diseño. Gracias a esto garantizaremos el uso de la red sin interrupciones ni malos niveles de señal que supongan dificultades en las comunicaciones, ofreciendo una operatividad ininterrumpida y una experiencia de usuario óptima en el sistema.

3.9. Codificación de los emplazamientos

Hemos definido una codificación para los emplazamientos del tramo con el fin de poder identificarlos de una manera más sencilla.

En este caso hemos optado por la siguiente codificación:

Emplazamientos tipo BTS → BTS 1

- **BTS:** Módulo de control y módulo radiante
- **X:** Número de la BTS

Ejemplo:

- ★ BTS 1
- RRU 1.1
- RRU 1.2
- RRU 1.3
- RRU 1.4
- ★ BTS 2
- RRU 2.1
- RRU 2.2
- RRU 2.3
- RRU 2.4
- ★ BTS 3
- RRU 3.1
- RRU 3.2
- RRU 3.3
- RRU 3.4

Figura 31. Nombre emplazamiento tipo BTS.

Emplazamiento tipo RRU → RRU 1.1

RRU: Módulo radiante

X: BTS a la cual pertenece el módulo radiante

X: Número de la RRU

Ejemplo:

- ★ BTS 1
- RRU 1.1
- RRU 1.2
- RRU 1.3
- RRU 1.4
- ★ BTS 2
- RRU 2.1
- RRU 2.2
- RRU 2.3
- RRU 2.4
- ★ BTS 3
- RRU 3.1
- RRU 3.2
- RRU 3.3
- RRU 3.4

Figura 32. Nombre emplazamiento tipo RRU.

En las Figura 31 y Figura 32 se muestra la jerarquía de los emplazamientos de la red. Las BTS se numeran de manera secuencial (1, 2, 3...). Bajo cada BTS, hay cuatro RRU que también están secuencialmente numeradas (1.1, 1.2... para la BTS 1 y así sucesivamente). De esta manera realizamos una estructura organizativa donde cada RRU es un subcomponente de una BTS específica, permitiendo una identificación y administración sistemática de los equipos dentro de la red.

3.10. Listado de emplazamientos

Con la codificación mencionada previamente hemos obtenido el listado de emplazamientos que ubicaremos a lo largo de todo el trazado ferroviario. Dicho listado se muestra en la Tabla 3:

TIPO	CÓDIGO
BTS	BTS 1
RRU	RRU 1.1
RRU	RRU 1.2
RRU	RRU 1.3
RRU	RRU 1.4
BTS	BTS 2
RRU	RRU 2.1
RRU	RRU 2.2
RRU	RRU 2.3
RRU	RRU 2.4
BTS	BTS 3
RRU	RRU 3.1
RRU	RRU 3.2
RRU	RRU 3.3
RRU	RRU 3.4
BTS	BTS 4
RRU	RRU 4.1
RRU	RRU 4.2
RRU	RRU 4.3
RRU	RRU 4.4
BTS	BTS 5
RRU	RRU 5.1
RRU	RRU 5.2
RRU	RRU 5.3
RRU	RRU 5.4
BTS	BTS 6
RRU	RRU 6.1
RRU	RRU 6.2
RRU	RRU 6.3
RRU	RRU 6.4
BTS	BTS 7

RRU	RRU 7.1
RRU	RRU 7.2
RRU	RRU 7.3
RRU	RRU 7.4
BTS	BTS 8
RRU	RRU 8.1
RRU	RRU 8.2
RRU	RRU 8.3
RRU	RRU 8.4

Tabla 3. Listado de emplazamientos.

3.11. Plan de frecuencias

Se describe en este punto el plan de frecuencias adoptado en el proyecto. Como ya se ha mencionado, la banda de frecuencias reservada para GSM-R es la de 876-880 MHz para la banda ascendente desde móvil y 921-925 MHz para la banda descendente hacia el móvil. Banda recomendada por la ERC (European Radiocommunications Committee) [30] para su uso en las redes móviles privadas de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) [11].

La identificación de la portadora de frecuencia en el sistema GSM-R se realiza a través del número absoluto de canal de radiofrecuencia ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number) [31]. Este código ARFCN se utiliza para asignar canales o portadores específicos en el sistema. Este proceso de asignación de canales se lleva a cabo para cada estación base y es esencial para la transmisión y recepción de señales en el sistema GSM-R.

Para los sistemas GSM existe la siguiente tabla ARFCN (Tabla 4):

BANDA	DESIGNACIÓN	ARFCN	$F_{uplink}(n)$	$F_{downlink}(n)$
GSM 500	GSM 450	259-293	$450.6 + 0.2 \cdot (n - 259)$	$F_{uplink}(n) + 10$
	GSM 480	306-340	$470 + 0.2 \cdot (n - 306)$	$F_{uplink}(n) + 10$
GSM 700	GSM 750	438-511	$742.7 + 0.2 \cdot (n - 438)$	$F_{uplink}(n) + 30$
GSM 800	GSM 850	128-251	$824.2 + 0.2 \cdot (n - 128)$	$F_{uplink}(n) + 45$
GSM 900	P-GSM	1-124	$890 + 0.2n$	$F_{uplink}(n) + 45$
	E-GSM	0-124 975-1023	$890 + 0.2n$ $890 + 0.2n(n - 955)$	$F_{uplink}(n) + 45$
	GSM-R	0-124 975-1023	$890 + 0.2n$ $890 + 0.2n(n - 955)$	$F_{uplink}(n) + 45$
GSM 1800	DCS 1800	512-885	$1710.2 + 0.2 \cdot (n - 512)$	$F_{uplink}(n) + 95$
GSM 1900	PCS 1900	512-810	$1850.2 + 0.2 \cdot (n - 512)$	$F_{uplink}(n) + 80$

Tabla 4. Asignación de frecuencias ARFCN (Fuente:[32]).

La conversión entre canales y frecuencias se determina mediante la siguiente fórmula que relaciona estos parámetros:

$$F_{uplink}(n) = 876.2 + 0.2 \cdot (n - 955) \quad 955 < n < 974$$

$$F_{downlink}(n) = F_{uplink}(n) + 45 \quad 955 < n < 974$$

Ecuación 1. Cálculo de la frecuencia ascendente y descendente.

En el contexto del sistema, donde $F_{uplink}(n)$ y $F_{downlink}(n)$ representan las frecuencias en MHz de los enlaces ascendente y descendente respectivamente, el plan de frecuencias se expresará en canales.

La definición del número de canales y sus respectivas frecuencias se ha fundamentado en diferentes aspectos, entre los que se incluyen los estándares de calidad de servicio y las necesidades de tráfico establecidas por la línea. Estos criterios toman en cuenta la proyección del tráfico máximo simultáneo durante las horas de mayor carga y densidad de tráfico generado, focalizándose particularmente en las celdas que brindan cobertura a estaciones y a un grupo mayor de usuarios.

La importancia de los niveles de potencia, tanto en la señal interferente como en la portadora, es algo importante para garantizar la calidad de servicio y la tasa de error de bits (BER) en la comunicación binaria a través del canal de señales digitales. La interferencia puede manifestarse desde una reducción casi insignificante en la calidad de la señal hasta una degradación que hace que la radiocomunicación sea impracticable. La optimización del espectro radioeléctrico mediante la reutilización de frecuencias implica un equilibrio delicado entre la reutilización y la relación entre la señal portadora y la señal interferente, todo ello con el fin de cumplir con los requisitos establecidos por el proyecto.

Se distinguen diferentes tipos de interferencias:

- **Interferencia Cocanal:** Es interferencia generada por emisiones que comparten la misma frecuencia que la celda servidora, lo que puede afectar la calidad de la señal.
- **Interferencia de Primer Canal Adyacente:** Ocurre cuando hay una separación de un canal, equivalente a 200 kHz, entre la celda servidora y la fuente interferente.
- **Interferencia de Segundo Canal Adyacente:** Implica una separación de dos canales, es decir, 400 kHz, entre la celda servidora y la interferente.

- **Interferencia de Tercer Canal Adyacente:** Se presenta cuando existe una separación de tres canales, equivalente a 600 kHz, entre la celda servidora y la interferente.

•

Los dos primeros tipos de interferencia (interferencia Cocanal y de Primer Canal Adyacente) son las más significativas, teniendo en cuenta las especificidades del filtrado en la recepción que todos los terminales móviles GSM-R deben cumplir. Además, es esencial tener en cuenta que tanto la señal interferente como la señal deseada pueden estar sujetas a los efectos de desvanecimiento de la señal.

La especificación técnica 3GPP TS 05.05 V20.0.0 (2005-11-25) establece recomendaciones sobre los niveles de referencia para la relación portadora frente a interferente [33]. Aunque la recomendación es C/I cocanal > 9 dB y C/I adyacente > -9 dB, se establece un requisito más estricto de C/I > 15 dB en sistemas GSM-R para lograr una comunicación de alta calidad y un flujo de datos máximo, introduciendo un margen de seguridad de 6 dB en la planificación. De esta manera tendremos la siguiente tabla:

Tipo de interferencia (C/I)	3GPP TS 05.05 V20.0.0	Planificación
Interferencia Cocanal	9 dB	15 dB
Interferencia de primer canal adyacente (200 kHz)	-9 dB	-3 dB
Interferencia de primer canal adyacente (400 kHz)	-41 dB	-41 dB
Interferencia de primer canal adyacente (600 kHz)	-49 dB	-49 dB

Tabla 5. Planificación de interferencias.

En el estudio del efecto de las interferencias debemos separar las de origen cocanal con las de producidas por los canales adyacentes. Para ello, tenemos la siguiente fórmula:

$$Interferencia_{total} = Interferencia_{Cocanal} + k \cdot Interferencia_{Adyacentes}$$

Ecuación 2. Cálculo de la Interferencia Total

Para poder cumplir con el objetivo de la planificación de C/I > 15 dB, establecemos una separación mínima de dos canales entre la celda servidora y las celdas adyacentes de primer y segundo grado. Esta disposición asegura que se satisfagan los requisitos globales, ya que se han establecido separaciones mínimas entre canales para garantizar lo siguiente:

- Interferencia cocanal → 15 dB
- Interferencia adyacente → -3 dB

3.11.1. Patrón de frecuencias

Se ha diseñado un patrón de repetición con el fin de facilitar la planificación de las frecuencias que consiste en una secuencia de frecuencias con un intervalo entre ellas que se van asignando a las celdas consecutivas a lo largo del tramo. Del número de frecuencias que hacemos uso en el patrón de repetición va a depender de la distancia de reutilización y la calidad de la red.

El patrón de reutilización que hemos considerado es el compuesto por los canales mostrados en la Tabla 6 :

GRUPO	FRECUENCIA (MHz)	GRUPO	FRECUENCIA (MHz)
A	955	J	956
B	957	K	958
C	959	L	960
D	961	M	962
E	963	N	964
F	965	O	966
G	967	P	968
H	969	Q	970
I	971	R	972

Tabla 6. Patrón de frecuencias.

Como se puede apreciar, el patrón de repetición establece que cada 18 emplazamientos se repite la frecuencia, consiguiendo con esto que dos celdas que transmiten la misma frecuencia tengan suficiente separación para reducir la posibilidad de interferencia cocanal y adyacente.

La Figura 33 muestra un esquema de celdas de frecuencias, representando una secuencia de la A a la R. Cada celda está coloreada alternativamente en verde y amarillo, lo que simboliza los diferentes grupos de frecuencia en un patrón de reutilización de frecuencias, para minimizar la interferencia entre celdas adyacentes.

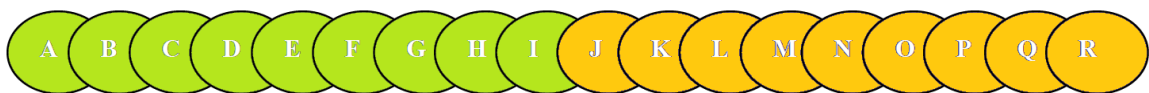


Figura 33. Celdas de frecuencias.

En nuestra propuesta, la distancia promedio entre emplazamientos ronda los 3 km, lo que nos proporciona una distancia media de reutilización que supera los 50 km. La separación entre los canales de las celdas adyacentes se ha fijado en dos canales, mientras que la distancia entre grupos de frecuencias será de al menos 25 km, lo cual se considera adecuado.

3.11.2. Asignación de frecuencias

Como resultado de la utilización del patrón de frecuencias previo, en la Tabla 7 se detalla la asignación de frecuencias a cada uno de los emplazamientos:

CÓDIGO	CELDA	FRECUENCIA (MHz)
BTS 1 E	1	876.0
BTS 1 O	2	921.0
RRU 1.1 E	3	876.4
RRU 1.1 O	4	921.4
RRU 1.2 E	5	876.8
RRU 1.2 O	6	921.8
RRU 1.3 E	7	877.2
RRU 1.3 O	8	922.2
RRU 1.4 E	9	877.6
RRU 1.4 O	10	922.6
BTS 2 E	11	878.0
BTS 2 O	12	923.0
RRU 2.1 E	13	878.4
RRU 2.1 O	14	923.4
RRU 2.2 E	15	878.8
RRU 2.2 O	16	923.8
RRU 2.3 E	17	879.2
RRU 2.3 O	18	924.2
RRU 2.4 E	19	876.0
RRU 2.4 O	20	921.0
BTS 3 E	21	876.4
BTS 3 O	22	921.4
RRU 3.1 E	23	876.8
RRU 3.1 O	24	921.8
RRU 3.2 E	25	877.2
RRU 3.2 O	26	922.2
RRU 3.3 E	27	877.6
RRU 3.3 O	28	922.6
RRU 3.4 E	29	878.0
RRU 3.4 O	30	923.0
BTS 4 E	31	878.4
BTS 4 O	32	923.4
RRU 4.1 E	33	878.8
RRU 4.1 O	34	923.8
RRU 4.2 E	35	879.2
RRU 4.2 O	36	924.2
RRU 4.3 E	37	876.0
RRU 4.3 O	38	921.0
RRU 4.4 E	39	876.4
RRU 4.4 O	40	921.4
BTS 5 E	41	876.8
BTS 5 O	42	921.8
RRU 5.1 E	43	877.2
RRU 5.1 O	44	922.2
RRU 5.2 E	45	877.6
RRU 5.2 O	46	922.6
RRU 5.3 E	47	878.0
RRU 5.3 O	48	923.0
RRU 5.4 E	49	878.4

RRU 5.4 O	50	923.4
BTS 6 E	51	878.8
BTS 6 O	52	923.8
RRU 6.1 E	53	879.2
RRU 6.1 O	54	924.2
RRU 6.2 E	55	876.0
RRU 6.2 O	56	921.0
RRU 6.3 E	57	876.4
RRU 6.3 O	58	921.4
RRU 6.4 E	59	876.8
RRU 6.4 O	60	921.8
BTS 7 E	61	877.2
BTS 7 O	62	922.2
RRU 7.1 E	63	877.6
RRU 7.1 O	64	922.6
RRU 7.2 E	65	878.0
RRU 7.2 O	66	923.0
RRU 7.3 E	67	878.4
RRU 7.3 O	68	923.4
RRU 7.4 E	69	878.8
RRU 7.4 O	70	923.8
BTS 8 E	71	879.2
BTS 8 O	72	924.2
RRU 8.1 E	73	876.0
RRU 8.1 O	74	921.0
RRU 8.2 E	75	876.0
RRU 8.2 O	76	921.0
RRU 8.3 E	77	876.4
RRU 8.3 O	78	921.4
RRU 8.4 E	79	876.8
RRU 8.4 O	80	921.8

Tabla 7. Asignación de frecuencias.

Tal y como se puede ver en la tabla, el patrón de repetición establece cada 18 emplazamientos, a partir de esta se repite la frecuencia y comienza de nuevo la serie.

3.12. Estudio de tráfico

En apartado se lleva a cabo un análisis del modelo de tráfico en el contexto del despliegue del sistema GSM-R. Inicialmente, se abordará la naturaleza de las comunicaciones que la red GSM-R proyectada debe respaldar. Posteriormente, se realizará una evaluación del tráfico generado en dicha red, considerando factores clave como los intentos de llamada, la duración promedio de estas y el número simultáneo de usuarios que acceden al establecimiento de llamadas.

El objetivo principal de esta fase es calcular el tráfico total que el sistema deberá gestionar, con el fin de adecuar el dimensionamiento de cada uno de los interfaces que conforman el subsistema de estaciones base. Estos interfaces incluyen:

- Interfaz Aire (Um)

- Interfaz BTS – BSC (Abis)
- Interfaz BSC – TRAU (Asub)
- Interfaz TRAU – MSC (A)

Se dimensionará el sistema para abarcar todas las necesidades de comunicación, tanto en voz como en datos, asociadas con los servicios de radiotelefonía móvil general, labores de maniobra y mantenimiento, así como vigilancia y seguridad de ADIF [9]. Este enfoque integral asegurará la cobertura efectiva de todas las demandas comunicativas en el ámbito ferroviario.

3.12.1. Modelo de tráfico

El modelo de tráfico en una red GSM-R tiene como objetivos fundamentales definir el volumen de tráfico, abarcando tanto las comunicaciones de voz como de datos necesarias para las operaciones ferroviarias, y establecer la distribución geográfica del tráfico a lo largo de la línea, identificando las zonas de mayor demanda. Este proceso de diseño se basa en los intentos de llamadas durante la hora pico (BHCA), considerando que cualquier cuello de botella podría resultar en el rechazo de llamadas, comprometiendo los objetivos de la red.

El sistema GSM-R se caracteriza como un "sistema de pérdidas" debido a sus recursos limitados, representados por los canales de comunicación compartidos entre usuarios. La asignación de recursos se realiza solo si están disponibles; de lo contrario, se produce un bloqueo y se pierde la solicitud del usuario.

La cantidad de tráfico que puede absorber un sistema con recursos limitados se determina mediante la probabilidad de bloqueo, modelada mediante la fórmula de Erlang-B [34]. Esta fórmula define la capacidad del sistema en función del número de canales disponibles y la probabilidad de bloqueo. Dicha fórmula es:

$$Pb = B(N, A) = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{k=0}^N \frac{A^k}{k!}}$$

Ecuación 3. Cálculo de Probabilidad de Bloqueo.

Donde:

- Pb = Probabilidad Bloqueo
- N = Número de Canales
- A = Tráfico Total Ofrecido
- k = Canal para el cálculo de la probabilidad de bloqueo

Este enfoque se aplica de manera independiente a la estrategia de asignación de recursos y al modelo adoptado. Al considerar la probabilidad de bloqueo para cada interfaz dentro del Subsistema de Estaciones Base (BSS) y el Subsistema de Conmutación de Red (NSS), se siguen las recomendaciones de EIRENE [19] y MORANE [20], que se detallan a continuación:

Interfaz	P_b
Interfaz BTS - BSC	1%
Interfaz BSC - MSC	0.1%
Interfaz MSC - Otros elementos	0.1%
Interfaz Aire	1%

Tabla 8. Probabilidad de bloqueo interfaces.

La Tabla 8 muestra la probabilidad de bloqueo (P_b) para las diferentes interfaces. El bloqueo se refiere a la incapacidad de una red para completar una conexión solicitada. Según se puede apreciar, hay un 1% de probabilidad de bloqueo en la interfaz entre la Estación Base Transceptora (BTS) y la Controladora de Estación Base (BSC), y en la interfaz Aire, que es la conexión inalámbrica con el dispositivo del usuario. Las interfaces entre la BSC y el Centro de Conmutación Móvil (MSC) y entre el MSC y otros elementos tienen una probabilidad de bloqueo mucho menor, del 0.1%. Estos valores indican el rendimiento de la red y su capacidad para manejar el tráfico bajo condiciones normales de operación.

3.12.2. Tipo de tráfico

Considerando la distribución que se ha establecido previamente, se diferencian los diferentes tipos de tráfico (voz o datos) en función del tipo de servicio que la línea presenta. Es importante destacar que los tipos de servicio han sido previamente definidos en el apartado Servicios, proporcionando una definición detallada de cada uno de ellos.

3.12.3. Características del tráfico

En el proceso de estimación del tráfico, nos enfocaremos exclusivamente en el tráfico de voz, dado que el volumen de datos a baja velocidad (ETCS) y mensajes cortos (SMS) representa una ocupación mínima de los recursos del sistema en comparación con las llamadas de voz. Además, para estos servicios, se asignarán canales dedicados, y las estimaciones se realizarán en el escenario más desfavorable, que corresponde a la hora cargada con el máximo número de usuarios intentando acceder a las llamadas simultáneamente.

En el caso particular de los recursos de radio en la Interfaz Aire, se caracterizan por su independencia entre celdas. En lugar de considerar el número de abonados y el tráfico generado en la línea de estudio, analizaremos el tráfico simultáneo máximo previsto en hora cargada en dichas celdas, teniendo en cuenta el caso más desfavorable. Por lo tanto, aquellas celdas con una mayor zona de influencia en términos de número de usuarios serán

asignadas con una tasa de tráfico más elevada en comparación con aquellas con una densidad de tráfico menor.

3.12.4. Cálculo del tráfico

Considerando el número de terminales transmitiendo en cada tipo de celda, la cantidad de llamadas realizadas por cada usuario y la duración media de las llamadas, específicamente durante la hora cargada se realiza una estimación del tráfico. En este análisis, implementaremos la fórmula Erlang C para calcular este tráfico. Es la siguiente:

$$\rho = \lambda \cdot T$$

Ecuación 4. Cálculo del Tráfico.

Donde:

- ρ = Tráfico de Erlang
- λ = Intentos de llamadas por segundo.
- T = Duración media en segundos de las llamadas.

Este enfoque nos permitirá obtener una estimación precisa del tráfico en función de los parámetros relevantes en el escenario de máxima demanda. En el proceso de estimación de tráfico, se contempla que las llamadas punto a multipunto se añadirán al tráfico de las llamadas punto a punto con el que se obtiene el tráfico total de la celda.

3.12.5. Tipo de celdas

Se considera que en el trazado de la línea ferroviaria puede haber los siguientes tipos de celdas en función al tráfico demandado mostrado en la Tabla 9:

CELDA	TRANSMISORES (activos + reservas)	Entornos
Rural	1+1	Tipo de celda comúnmente utilizado a lo largo de la vía.
Urbana	2+1	Configuración de celda preferida en núcleos urbanos o estaciones de gran tamaño con una alta presencia de operadores y personal de mantenimiento.
Mantenimiento	1+1	Celda diseñada para entornos de estacionamiento de trenes, como cocheras o áreas con concentración significativa de personal de mantenimiento.

Tabla 9. Tipo de celdas.

La Tabla 9 describe diferentes tipos de celdas para una red GSM-R, clasificadas según el entorno y la cantidad de transmisores activos y de reserva. En zonas rurales, se utiliza una configuración 1+1, que es común a lo largo de la vía. Para áreas urbanas, donde hay una mayor presencia de operadores y necesidades de mantenimiento, se prefiere una configuración 2+1 debido a la densidad de usuarios y edificios. Las celdas de mantenimiento, diseñadas para zonas como cocheras o donde hay personal de mantenimiento concentrado, también utilizan una configuración 1+1.

En el contexto del caso de estudio, dado que se trata de una red de línea convencional con un tráfico significativamente menor y una afluencia baja, no se percibe como necesario incorporar ningún tipo de celda adicional más allá de la celda estándar, es decir, la celda rural. En este escenario, la celda rural se considera adecuada para satisfacer todas las necesidades de servicios proyectados en la línea.

La Figura 34 muestra un diagrama conceptual de los inputs necesarios para definir una celda en la red. La torre central representa la estación base, y alrededor de ella, se identifican varios elementos clave como el tipo de tráfico, tipo de llamada, cobertura deseada y el número estimado de usuarios. También incluye consideraciones sobre el nivel de servicio (QoS) y la cantidad de llamadas simultáneas. Este diagrama nos es de utilidad para planificar la capacidad de la red y asegurar que la infraestructura pueda soportar la demanda de comunicaciones.

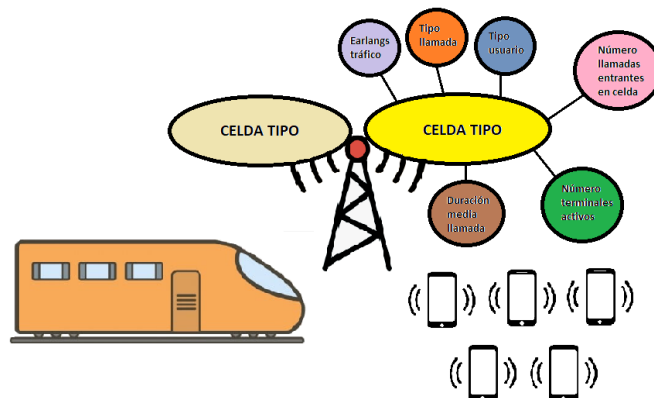


Figura 34. Diagrama Input de celda.

3.12.6. Tráfico por celda

Es fundamental establecer el límite máximo de trenes que pueden ocupar simultáneamente una misma celda. Este escenario implica la gestión de tráfico de señalización ETCS [35], que se suma al flujo de comunicaciones de voz y datos generadas por los demás usuarios de la red. Esto abarca desde llamadas de voz realizadas desde la cabina a bordo de cada

tren hasta llamadas punto a punto o en grupo destinadas a actividades de mantenimiento, maniobras, entre otras operaciones.

Al abordar el escenario más desafiante previsto en el marco de este trabajo, se ha considerado la posibilidad excepcional de que dos trenes compartan simultáneamente una misma celda, teniendo en cuenta la naturaleza unidireccional de la red ferroviaria. Para asegurar la eficiente transmisión del tráfico de señalización proveniente del sistema ETCS [35], aspecto crucial en esta dinámica, se reservarán específicamente dos canales de radio GSM-R.

Dada la importancia crítica de la red y de los servicios ofrecidos, se incorporarán de manera adicional llamadas específicas destinadas a maniobras. Este enfoque adicional se prevé especialmente para situaciones durante el arranque de la línea, la supervisión de incidencias o la puesta en marcha, fortaleciendo así la capacidad del sistema para responder efectivamente a circunstancias particulares que puedan surgir en momentos críticos.

En las siguientes tablas se presenta un resumen del tráfico generado en una celda y estación tipo durante la hora cargada. La estimación del tráfico para los distintos tipos se realiza utilizando datos específicos suministrados por ADIF [18], así como información adicional de líneas secundarias. Esta recopilación de datos se analiza aplicando la fórmula de Erlang C, que es un modelo matemático utilizado en la teoría de colas para determinar la probabilidad de congestión en sistemas de telecomunicaciones.

Llamadas punto a punto:

Tipo de Usuario	Tipo de Llamada	Canales activos por celda	Llamadas entrantes en hora cargada en celda	Duración media en segundos de las llamadas	Tráfico en Erlang en hora cargada por celda
Radio en cabina	Llamadas al puesto de control	2	2	60	0.07
	Llamadas a otro terminal de la red		1	120	0.07
	Llamadas de emergencia		0.042	45	0
Terminal personal de mantenimiento	Llamadas a otro terminal de la red	3	2	120	0.2
	Llamadas de emergencia		0.042	45	0
Puesto de control	Llamadas entrantes del puesto de control	1	2	30	0.02
Telefonía fija y usuario GSM-R en celda	Llamada entre telefonía fija y GSM-R	1	2	120	0.07

SUBTOTAL		0.43
-----------------	--	-------------

Tabla 10. Tráfico en llamadas punto a punto.

Llamadas punto a multipunto:

Tipo de Usuario	Tipo de llamada	Canales activos por celda	Llamadas entrantes en hora cargada en celda	Duración media en segundos de las llamadas	Tráfico en Erlang en hora cargada por celda
Terminal portátil de personal de estación (GPH)	Llamadas de difusión/grupo	3	1	30	0.03
Terminal portátil de personal de seguridad (GPH)	Llamadas de difusión/grupo	3	1	45	0.04
Terminal portátil de personal de mantenimiento (OPH)	Llamadas de difusión/grupo	3	1	30	0.03
Puesto de control	Llamadas de difusión/grupo	1	2	30	0.02
SUBTOTAL					0.12

Tabla 11. Tráfico en llamadas punto a multipunto.

Llamadas para operaciones de maniobra:

Tipo de Usuario	Tipo de llamada	Canales activos por celda	Llamadas entrantes en hora cargada en celda	Duración media en segundos de las llamadas	Tráfico en Erlang en hora cargada por celda
Operaciones de maniobras	Llamadas de difusión/grupo	3	2	45	0.08
Operaciones de maniobras	Llamadas de maniobra	1	2	600	0.33
SUBTOTAL					0.41

Tabla 12. Tráfico en llamadas para operaciones de maniobra.

Con esta estimación del tráfico de voz y datos podemos comprobar que la red necesitará respaldar 0,96 Erlang ($0.43 + 0.12 + 0.41$) dedicados a las llamadas de voz, que incluyen todos los tipos de llamadas posibles en la red, así como el tráfico requerido para llevar a cabo las operaciones de maniobra.

Haciendo uso de la tabla de Erlang-B y partiendo de una probabilidad de bloqueo del 1%, determinamos que se necesitarán:

- 5 canales para gestionar los 0,96 Erlang de tráfico de voz y datos previstos como máximo en la celda tipo que conforma la línea objeto de análisis.

Considerando, además, los 2 canales reservados para el tráfico ETCS [35], se establece la necesidad total de:

- 7 canales para garantizar un bloqueo inferior al 1% con los que la red puede admitir hasta 2.5 Erlang superando del tráfico que se ha estimado y asegurando suficiente capacidad de tránsito.

3.12.7. Diseño y dimensionamiento del subsistema radio

Se dimensiona el tráfico de las interfaces que dan soporte al estudio de tráfico que se ha estimado para nuestro proyecto.

Dimensionamiento de la Interfaz Aire (Um)

El interfaz aire (Um) tiene un papel muy importante al definir la comunicación entre las estaciones base (BTS) y los terminales móviles. Esta interfaz se divide en tres capas: Física, Enlace y Red.

Las tramas TDMA utilizadas en las redes GSM-R ofrecen hasta 8 canales repartidos entre los diferentes tipos de tráfico. Cada portadora proporciona 7 canales dedicados para tráfico de voz o datos y 1 canal específico para señalización. La cantidad de canales de señalización, a su vez, está directamente relacionada con el número de portadoras presentes en una celda.

En la Tabla 13 se muestra el número preciso de canales de señalización requeridos, considerando tanto el número de portadoras como el tráfico máximo que la celda puede gestionar, según los parámetros establecidos en la tabla de Erlang-B, considerando una probabilidad de bloqueo del 1%:

Trx	Canales de tráfico	Canales de señalización	Tráfico máximo (Erlang)
1	7	1	2.5
2	14	2	7.35
3	22	2	13.65
4	29	3	19.49

Tabla 13. Canales necesarios en función del número de portadoras.

Utilizaremos una configuración 1+1, es decir, un transmisor activo y otro de reserva a modo de reserva con el objetivo de asegurar el funcionamiento de la estación base aun con la caída del transmisor activo. Este solo entrará en servicio si falla el principal.

Dimensionamiento de la BTS-BSC(ABIS)

Esta interfaz conectará las estaciones base (BTS) y controladora de estaciones base (BSC) implementando una topología de anillo con el fin de ofrecer una mayor protección ante caída de cualquier equipo del sistema y permitiendo la conmutación de forma automática sin cortar las llamadas en curso.

En la Tabla 14 se muestra una estimación del tráfico y configuración de los emplazamientos que se implementan en el estudio:

Emplazamiento	Trx	Celda	Tipo Celda	Canales ETCS	Canales voz+datos
BTS1	1+1	001	Tipo	2	5
RRU1.1	1+1	002	Tipo	2	5
RRU1.2	1+1	003	Tipo	2	5
RRU1.3	1+1	004	Tipo	2	5
RRU1.4	1+1	005	Tipo	2	5
BTS2	1+1	006	Tipo	2	5
RRU2.1	1+1	007	Tipo	2	5
RRU2.2	1+1	008	Tipo	2	5
RRU2.3	1+1	009	Tipo	2	5
RRU2.4	1+1	010	Tipo	2	5
BTS3	1+1	011	Tipo	2	5
RRU3.1	1+1	012	Tipo	2	5
RRU3.2	1+1	013	Tipo	2	5
RRU3.3	1+1	014	Tipo	2	5
RRU3.4	1+1	015	Tipo	2	5
BTS4	1+1	016	Tipo	2	5
RRU4.1	1+1	017	Tipo	2	5
RRU4.2	1+1	018	Tipo	2	5
RRU4.3	1+1	019	Tipo	2	5

RRU4.4	1+1	020	Tipo	2	5
BTS5	1+1	021	Tipo	2	5
RRU5.1	1+1	022	Tipo	2	5
RRU5.2	1+1	023	Tipo	2	5
RRU5.3	1+1	024	Tipo	2	5
RRU5.4	1+1	025	Tipo	2	5
BTS6	1+1	026	Tipo	2	5
RRU6.1	1+1	027	Tipo	2	5
RRU6.2	1+1	028	Tipo	2	5
RRU6.3	1+1	029	Tipo	2	5
RRU6.4	1+1	030	Tipo	2	5
BTS7	1+1	031	Tipo	2	5
RRU7.1	1+1	032	Tipo	2	5
RRU7.2	1+1	033	Tipo	2	5
RRU7.3	1+1	034	Tipo	2	5
RRU7.4	1+1	035	Tipo	2	5
BTS8	1+1	036	Tipo	2	5
RRU8.1	1+1	037	Tipo	2	5
RRU8.2	1+1	038	Tipo	2	5
RRU8.3	1+1	039	Tipo	2	5
RRU8.4	1+1	040	Tipo	2	5

Tabla 14. Tráfico por emplazamientos.

En el tramo de vía del estudio se instalarán ocho (8) estaciones base transceptoras distribuidas (BTS) y treinta y dos (32) cabezas remotas (RRU) que darán servicio a lo largo del trazado.

Se reservarán 5 slots de trama PCM (64 kbps) en la interfaz ABIS, por lo que se van a incluir hasta 6 Trx por cada anillo lógico

En la Tabla 15, se muestran los anillos lógicos con la agrupación de BTS incluidas:

Emplazamiento	Trx	Anillo	TX. Activos
BTS1	1+1	A1	5
RRU1.1	1+1		
RRU1.2	1+1		
RRU1.3	1+1		
RRU1.4	1+1		
BTS2	1+1	A2	5
RRU2.1	1+1		
RRU2.2	1+1		
RRU2.3	1+1		
RRU2.4	1+1		
BTS3	1+1	A3	5
RRU3.1	1+1		
RRU3.2	1+1		
RRU3.3	1+1		
RRU3.4	1+1		
BTS4	1+1	A4	5
RRU4.1	1+1		
RRU4.2	1+1		
RRU4.3	1+1		
RRU4.4	1+1		
BTS5	1+1	A5	5
RRU5.1	1+1		
RRU5.2	1+1		
RRU5.3	1+1		
RRU5.4	1+1		
BTS6	1+1	A6	5
RRU6.1	1+1		

RRU6.2	1+1		
RRU6.3	1+1		
RRU6.4	1+1		
BTS7	1+1	A7	5
RRU7.1	1+1		
RRU7.2	1+1		
RRU7.3	1+1		
RRU7.4	1+1		
BTS8	1+1	A8	5
RRU8.1	1+1		
RRU8.2	1+1		
RRU8.3	1+1		
RRU8.4	1+1		

Tabla 15. Distribución de las BTS en subanillos lógicos.

Dimensionamiento de la BSC-TRAU (ASUB)

Esta interfaz se encarga de conectar el tráfico entre la controladora de estaciones base (BSC) y la unidad de transcodificación y adaptación de velocidades. Dicha unión se implementa sobre enlaces PCM30 con subdivisión de los slots de tiempo de 16 kbps hasta un máximo de 120 canales de 16 kbps

Para la estimación del tráfico total de una capa específica, tomamos en cuenta el número de estaciones base y unidades remotas derivadas de la planificación radioeléctrica, en nuestro caso treinta y dos (32). Utilizamos la fórmula de Erlang-B, considerando una probabilidad de bloqueo del 0,1% en la interfaz BSC - MSC.

Además, se reserva un canal para la operación y mantenimiento del subsistema radio a través de una conexión entre la BSC y la TRAU. De igual manera, se considera necesario un canal de señalización LAPD de 64 kbps para el control de la unidad de transcodificación y adaptación de velocidades. Este protocolo se encarga de establecer el vínculo entra las BTS y la BSC. Por otro lado, un nuevo canal de señalización SS7 para cursar el tráfico correspondiente a los servicios de localización es necesario.

El resultado de esta aplicación nos proporciona la cantidad de canales requeridos para gestionar el tráfico con una probabilidad de bloqueo del 0,1%. Con estos datos podremos dimensionar correctamente la infraestructura necesaria para respaldar un servicio eficiente, garantizando calidad y disponibilidad.

El tráfico que da soporte a la interfaz ASUB se muestra en la Tabla 16:

Tipo de tráfico	Canales de tráfico
Llamadas de voz y datos	8 canales de 16 kbps
ETCS	8 canales de 16 kbps
LAPD	1 canal de 64 kbps
NUC O&M	1 canal de 64 kbps
SS7	2 canales de 64 kbps
TOTAL canales 16 kbps	16
TOTAL canales 64 kbps	4

Tabla 16. Tráfico de la interfaz ASUB.

3.13. Sistema de comunicaciones fijas

En este apartado se definen los requisitos de la red de telecomunicaciones fijas en el proyecto. La estructura de esta red se ha estructurado en 3 niveles distintos:

- Nivel físico
- Nivel de transmisión
- Nivel de servicio

La red establecerá en todas sus capas funcionales rutas de transmisión de extremo a extremo, asegurando así el transporte eficiente de toda la información requerida por los servicios que respalda. Este enfoque sigue las capas de niveles recomendadas por el modelo OSI/ISO [36].

La Figura 35 ilustra la jerarquía del sistema de telecomunicaciones fijas. Comienza con el *Control de la Red*, que supervisa y gestiona todo el sistema. En el siguiente nivel, tenemos *Servicios GSM-R*, que incluye voz, datos y servicios sincronizados. El *Nivel de Transmisión* se ocupa del transporte y acceso, facilitando el paso de la información. Finalmente, el *Nivel Físico* consiste en la infraestructura tangible como la fibra óptica y el cableado estructurado que sostiene la red.

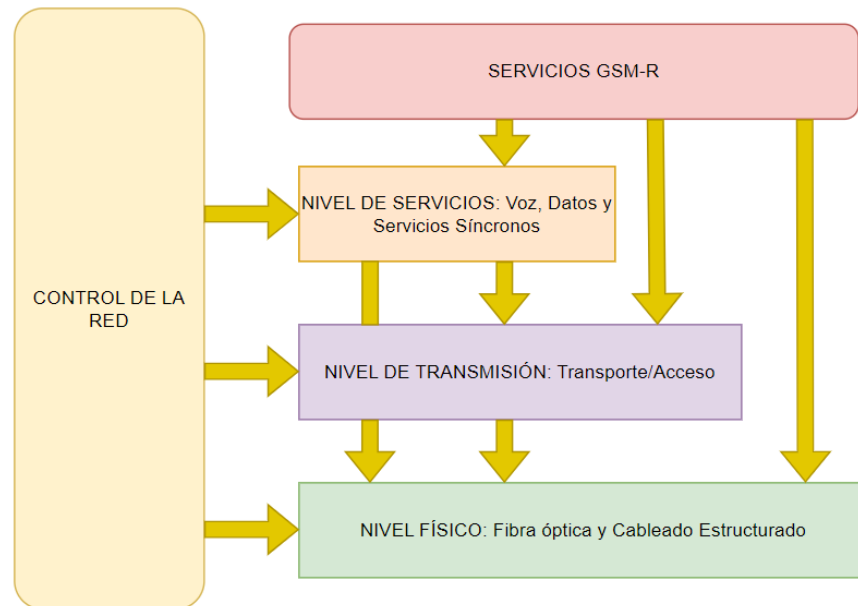


Figura 35. Esquema de Telecomunicaciones fijas (Fuente:[37])

La red de telecomunicaciones fijas deberá dar soporte y servicios a las operaciones, gestión, mantenimiento y administración de la línea. Con el objetivo de garantizar una transmisión eficiente, se implementará fibra óptica como medio principal, aprovechando la infraestructura de cables de fibra que se desplegará a lo largo del mismo tramo. Adicionalmente, se establecerán enlaces tipo E1 entre las Estaciones Base GSM-R (BTS) dentro de un mismo anillo y las Estaciones Base Controladoras (BSC). Esta red también permitirá el transporte del tráfico de la interfaz ABIS entre las diversas BTS (o módulos de sistemas, dado que se trata de un modelo de BTS distribuidas) mediante IP, conocido como ABIS sobre IP.

Con el objetivo de garantizar la continuidad del servicio, se implementarán servicios redundantes, asegurando que, en caso de un fallo en cualquier punto de la red de fibra óptica, los servicios sean redirigidos por una ruta alternativa, minimizando así el impacto en dichos servicios. Además, se planifica la escalabilidad de la red para adaptarse y soportar nuevos servicios que puedan surgir en el futuro.

3.13.1. Nivel físico

A nivel físico el sistema de comunicaciones fijas se basa en el despliegue de la fibra óptica que proporcionará enlace punto a punto a nivel físico ente los diferentes emplazamientos que hemos determinado en la planificación radioeléctrica.

El tendido troncal de la línea será de 32 fibras ópticas, y será el cable principal del cual dependerán el resto de los emplazamientos. Este tendido troncal concentrará todo el tráfico

que luego será repartido en los diferentes centros de control. En la Figura 36 se puede ver como se instala el tendido de fibra óptica paralelo a la vía.



Figura 36. Tendido de Fibra Óptica en línea convencional de ADIF Renfe (Fuente[38])

A partir del tendido troncal de 32 fibras ópticas realizaremos empalmes y segregaciones de 16 fibras ópticas para proporcionar conectividad a todas las estaciones base que hemos planificado.

La decisión de utilizar este número de fibras ópticas viene dada por ofrecer:

Alta capacidad y reparación para el futuro: La implementación de 32 fibras ópticas en el tendido principal es una medida proactiva para asegurar una capacidad de transmisión de datos que no solo cumple con las demandas actuales, sino que también se anticipa a las necesidades futuras. Garantizando la adaptación y escalabilidad del sistema fácilmente ante el crecimiento de la demanda y la integración de nuevas tecnologías.

Redundancia: La infraestructura de comunicaciones en el ámbito ferroviario debe ser excepcionalmente fiable. Al disponer de 32 fibras, podemos dedicar algunas exclusivamente a la redundancia, asegurando una continuidad operativa incluso en caso de fallos en una o varias fibras.

Eficiencias y segmentación: La presencia de 32 fibras ópticas permite una gestión más eficaz del tráfico de datos, facilitando la segmentación y priorización del tráfico según las necesidades específicas del sistema ferroviario. Esto resulta en una mayor eficiencia operativa y una mejor calidad de servicio.

3.13.2. Nivel de transmisión y transporte

La capa de transporte tiene la misión de dividir los datos generados por elemento de transmisión y los dirige a través del canal de datos del sistema hacia el receptor. Esta capa desempeña una función esencial al ofrecer un servicio de transporte de datos, sirviendo de barrera que aísla a las capas superiores de los pormenores de la implementación del transporte. En la prestación de este servicio de comunicaciones, la capa de transporte se encarga de establecer, mantener y finalizar de manera adecuada los circuitos virtuales.

A nivel de transmisión conformará las redes encargadas de dar respaldo a las comunicaciones entre los diversos emplazamientos ubicados a lo largo del trazado. Su función principal consistirá en proporcionar el soporte de transmisión necesario para las redes de conmutación, ya sean internas o externas, tanto de circuitos como de paquetes, con las cuales se establece la interconexión.

En el caso de nuestro trabajo las redes que conformarán el nivel de transmisión son las siguientes:

- **Red de Transporte SDH:** Conformada por los anillos troncales, convergiendo en ellos todo el tráfico de la red de acceso que conectará las Estaciones Base (BTS). Es esencial destacar que las redes SDH ofrecen un ancho de banda reservado y protegido para satisfacer las necesidades específicas de la red móvil GSM-R.
- **Red de Acceso SDH:** Conformada por anillos de menor capacidad, diseñados para recoger el tráfico procedente de los emplazamientos o estaciones base distribuidas a lo largo de la vía. Su función principal será transportar eficientemente el tráfico hasta los emplazamientos donde se establecerá la conexión con la red de transporte SDH.

3.13.3. Nivel de servicios

Esta capa, asume la responsabilidad de utilizar los recursos proporcionados a través de la red SDH o mediante fibras dedicadas del nivel físico.

Este nivel se centra en los servicios de transmisión síncronos. Estos servicios aprovechan la red SDH para brindar servicios, especialmente a las estaciones base (BTS) de la red GSM-R, facilitando la generación de enlaces punto a punto.

El sistema de telecomunicaciones fijas destinado a líneas ferroviarias también contempla el despliegue de servicios de voz a través de telefonía cableada o servicios de datos, como proporcionar conectividad IP a los usuarios de la red, tales como personal de mantenimiento o gestión y control.

3.13.4. Control de la red

El control de la red engloba los diversos gestores y órganos supervisores correspondientes a cada una de las redes y sistemas mencionados en los niveles previos, tales como transmisión, datos y sistema de supervisión de fibra óptica

3.14. Sistema de Energía

La implementación constará de un sistema de energía que pueda brindar suministro eléctrico a todas las instalaciones y poder alimentar así todos los equipos de telecomunicaciones.

Para garantizar el suministro de energía a los emplazamientos de GSM-R, se propone:

- Instalar un **transformador reductor en cada emplazamiento** con el objetivo de reducir la tensión de la línea eléctrica principal, que opera a 2200V, a niveles más seguros y adecuados para alimentar los equipos de telecomunicaciones.
- La energía provendrá de una única **línea eléctrica de 2200V** ya existente que se encuentra a lo largo de la vía, instalada en una canalización paralela a la misma.
- En los emplazamientos que albergan estaciones, se contempla la implementación de una **conexión eléctrica doble**. Gracias a esto, la estación tendría la capacidad de conmutar entre la línea principal de 2200V y su propia fuente de energía local.

Con este sistema se prevé la flexibilidad de utilizar tanto la línea principal como una fuente local, brindando redundancia en el suministro eléctrico. Es importante señalar que no es objeto de este trabajo detallar con más profundidad el sistema de energía.

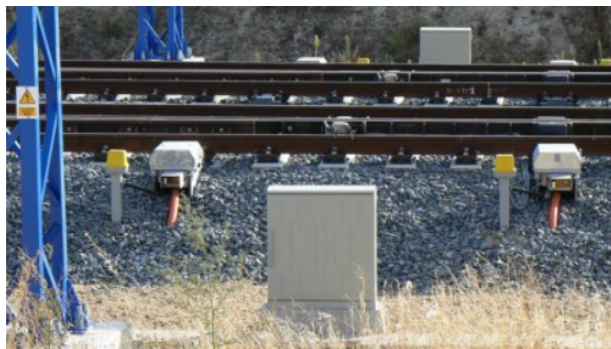


Figura 37. Armario transformador reductor en vía (Fuente[39])

3.15. Plan de obra

El objetivo del plan de obra es establecer un marco estructurado y detallado que guíe la ejecución eficiente y efectiva de todas las actividades necesarias para implementar y poner en funcionamiento el sistema de comunicaciones GSM-R. Este plan tiene como finalidad asegurar el despliegue exitoso del sistema, cumpliendo con los requisitos técnicos, cronogramas y estándares establecidos. Vamos a indicar las fases de las que constará dicho plan de obra en la Tabla 17:

1. PLANIFICACIÓN Y VALIDACIÓN RADIOELÉCTRICA
1.1. Ingeniería y validación del estudio radioeléctrico
1.2. Replanteos
1.3. Acopios de elementos del sistema GSM-R
2. DESPLIEGUE DE INFRAESTRUCTURA Y ESTRUCTURAS
2.1. Obra Civil (adecuación del terreno, losas de cimentación, etc.)
2.2. Montaje de las torres de telecomunicaciones
2.3. Instalación de equipos
2.4. Izado de las torres de telecomunicaciones
2.5. Instalación del sistema radiante en BTS
3. VERIFICACIÓN Y PUESTA EN MARCHA
3.1. Comprobación de equipos con tensión
3.2. Proyecto As-Built
3.3. Integración y puesta en servicio de las BTS
3.4. Instalación de equipos en edificios técnicos
3.5. Puesta en marcha de equipamiento en edificios técnicos
4. INTEGRACIÓN Y PRUEBAS FUNCIONALES
4.1. Integración del Sistema BSS

4.2. Integración del Sistema BSS con NSS
4.3. Pruebas funcionales
4.3. Pruebas de Calidad de Servicio

Tabla 17. Fases plan de obra

3.16. Normativa de aplicación

La implementación del sistema de comunicaciones GSM-R debe cumplir de manera estricta con un conjunto de normativas y estándares que rigen tanto el ámbito ferroviario como el de las comunicaciones. Este cumplimiento se extiende tanto a nivel internacional como nacional.

En el ámbito internacional, las regulaciones establecidas por organismos de renombre, como la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) [11] y la Agencia Europea de Ferrocarriles (ERA) [40], son fundamentales para garantizar la interoperabilidad y los estándares ferroviarios a nivel global. Además, los documentos relacionados con el sistema de radio europeo de control de trenes ERTMS/ETCS [6][35] desempeñan un papel esencial en este contexto.

Por otro lado, los estándares técnicos definidos por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI) [41] son críticos, ya que establecen las especificaciones técnicas del sistema GSM-R. La conformidad con estos estándares técnicos, junto con las regulaciones relativas a la seguridad y la privacidad de datos, garantiza el funcionamiento confiable del sistema y su cumplimiento con los requisitos legales.

En este contexto, el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias desempeña un papel central como entidad reguladora y supervisora. Su función principal radica en la determinación de la estrategia a seguir en caso de conflictos normativos. En última instancia, recae sobre esta entidad la responsabilidad de asegurar que la implementación del sistema GSM-R se ajuste rigurosamente a todas las regulaciones y estándares pertinentes, con el objetivo de proporcionar una comunicación ferroviaria eficiente y segura.

4. Conclusiones

Este proyecto ha significado más que la implementación de un sistema GSM-R, ha sido una investigación sobre las capacidades y el potencial de las telecomunicaciones en el ámbito ferroviario. Se ha establecido un marco sólido para la viabilidad técnica y operativa del sistema y para su evolución en el contexto de las tecnologías emergentes.

Aprendizajes clave y reflexiones:

Investigación integral y definición del sistema: El proceso comenzó con una investigación exhaustiva, estableciendo una base sólida para la comprensión del GSM-R. Este paso inicial ha sido crucial, permitiendo definir el sistema e identificar sus limitaciones y potenciales áreas de mejora. Este enfoque investigativo ha sido fundamental para garantizar una solución adecuada.

Planificación estratégica y simulaciones: La realización de simulaciones para la planificación de la cobertura radioeléctrica han permitido anticipar desafíos y adaptar nuestras estrategias de manera proactiva. Este enfoque metodológico ha asegurado una cobertura óptima y destaca la importancia de la planificación detallada en proyectos de este tipo. El aprendizaje sobre este tipo de software ha sido muy enriquecedor.

Gestión de interferencias y análisis de tráfico: La estrategia de asignación de frecuencias y el estudio de tráfico han sido investigaciones valiosas para la comprensión del comportamiento y las necesidades del sistema en diferentes escenarios. Estos análisis no solo mejoraron la eficiencia del sistema, sino que también proporcionaron insights sobre cómo los sistemas pueden ser diseñados para ser más adaptables y robustos.

Visión integral: La implementación del sistema de telecomunicaciones fijas y el sistema energía ayudan a tener una visión más global del proyecto. Estos sistemas deberían tener una investigación más exhaustiva que la realizada en este trabajo y podrían ser líneas futuras de investigación.

Mirando hacia el futuro:

Los resultados obtenidos han alcanzado la mayoría de las expectativas iniciales al diseñar un sistema GSM-R adaptado a las necesidades específicas de la línea ferroviaria objeto de nuestro estudio. Además, mirando hacia adelante, este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de las telecomunicaciones ferroviarias. Las lecciones aprendidas y los conocimientos adquiridos son muy importantes para abordar los desafíos futuros y aprovechar las oportunidades que surjan con la evolución de la tecnología.

En cuanto a las líneas futuras de investigación del proyecto existen varios aspectos en los que se puede continuar investigando:

- Realizar una investigación más exhaustiva con respecto a los sistemas de telecomunicaciones fijas y de gestión de energía. Estos componentes son muy importantes y merecen un análisis más profundo que lo detallado en este proyecto.
- Elaboración de un presupuesto detallado. La creación de un desglose presupuestario completo sería un paso importante para evaluar la viabilidad económica y facilitar la planificación estratégica de una implementación real en el futuro.
- La implementación del sistema GSM-R aquí diseñado sienta las bases para la integración con el sistema de gestión de tráfico ferroviario ERTMS Nivel 2. Ahondar más en la integración de este sistema avanzado permitirá una gestión más eficiente y segura del tráfico ferroviario, potenciando la capacidad y la seguridad operacional de la red.
- La transición al sistema FRMCS en un futuro también se vislumbra como una línea futura de desarrollo, prometiendo mejoras significativas en la comunicación y en la gestión del tráfico ferroviario a través de una plataforma más adaptable y potente. Esta transición es una evolución natural que ofrecerá una comunicación más confiable y un control de tráfico más dinámico.

5. Glosario

A continuación, se incluirá un resumen con los acrónimos de los elementos básicos para una mejor comprensión:

	ACRÓNIMO	DESCRIPCIÓN
ABC	Administration and Billing Center	Centro de Administración y Facturación
AC	Authentication Centre	Centro de Autenticación
ATO	Automatic Train Operation	Operación Automática de Tren
BSC	Base Station Controller	Controlador de Estación Base
BTS	Base Transceiver Station	Estación Transceptora Base
BSS	Base Station System	Sistema de Estación Base
CBS	Cell Broadcast Service	Servicio de Difusión Celular
EIR	Equipment Identification Registration	Registro de Identificación de Equipos
eMLPP	Enhanced Multilevel Precedence and Preemption	Precedencia y Preemergencia Multinivel Mejorada
ERTMS	European Rail Traffic Management System	Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario
ETCS	European Train Control System	Sistema Europeo de Control de Trenes
FA	Frequency Assignment	Asignación de Frecuencias
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System	Sistema de Comunicación Móvil Futuro para Ferrocarriles
HLR	Home Location Register	Registro de Ubicación de Hogar
GCR	Group Call Register	Registro de Llamadas de Grupo
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying	Modulación de Desplazamiento Mínimo Gaussiano
GSM	Global System for Mobile Communications	Sistema Global para Comunicaciones Móviles
IN	Intelligent Network	Red Inteligente
LDA	Location Dependent Addressing	Dirección Dependiente de la Ubicación
MSC	Mobile Services Switching Center	Centro de Conmutación de Servicios Móviles
NSS	Network Subsystem	Subsistema de Red
ODS	On-Board Data Server	Servidor de Datos a Bordo
OMC	Operation and Maintenance Center	Centro de Operaciones y Mantenimiento
OMS	Operation and Maintenance Subsystem	Subsistema de Operación y Mantenimiento
PMR	Private Mobile Radio	Radio Móvil Privada
PLMN	Public Land Mobile Network	Red Móvil Terrestre Pública
PPR	Public Protection and Disaster Relief	Protección Pública y Socorro en Caso de Desastre
SCP	Service Control Point	Punto de Control de Servicio
SMP	Service Management Service	Servicio de Gestión de Servicios
SMS	Short Message Service	Servicio de Mensajes Cortos
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer Français	Compañía Nacional de Ferrocarriles Francesa
SSP	Service Switching Point	Punto de Conmutación de Servicio
TRAU	Transcoding Rate and Adaptation Unit	Unidad de Transcodificación de Tasa y Adaptación

VBS	Voice Broadcast Service	Servicio de Difusión de Voz
VKLR	Virtual Key Load Receiver	Receptor Virtual de Carga de Claves
VLR	Visitor Location Register	Registro de Ubicación del Visitante
VMS	Voice Mail Service	Servicio de Correo de Voz

6. Bibliografía

- [1] “Maçanet-Massanes | Wiki Metro de Barcelona | Fandom.”
<https://metrodebarcelona.fandom.com/wiki/Maçanet-Massanes> (accessed Dec. 18, 2023).
- [2] “Línia R11 Barcelona Sants - Portbou per Granollers Centre i Girona.”
https://www.trenscat.com/renfe/r11_ct.html (accessed Dec. 18, 2023).
- [3] “Línia R11. Rodalies de Catalunya.” https://rodalies.gencat.cat/ca/sobre-rodalies/linies-i-estacions/servei_regionals/r11/ (accessed Dec. 18, 2023).
- [4] “macanet-massanes-52.jpg.” <https://wefer.com/w3/renfe/renfe-macanet-massanes/imagepages/macanet-massanes-52.htm> (accessed Dec. 18, 2023).
- [5] “Cerbère en Région de Occitania, France | Sygic Travel.”
<https://travel.sygic.com/es/poi/cerbere-region:202642> (accessed Dec. 18, 2023).
- [6] “ERTMS Signaling levels - ERTMS.” <https://www.ertms.net/about-ertms/ertms-signaling-levels/>
(accessed Dec. 18, 2023).
- [7] C. T. Lizarraga, “Análisis de las Necesidades de una Smart City en el Marco de un Desarrollo Sostenible” Master’s Thesis, Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, Spain, 2020.
- [8] A. Sniady and J. Soler, “An overview of GSM-R technology and its shortcomings,” *2012 12th Int. Conf. ITS Telecommun. ITST 2012*, pp. 626–629, 2012, doi: 10.1109/ITST.2012.6425256.
- [9] K. Kastell, S. Bug, A. Nazarov, and R. Jakoby, “Improvements in Railway Communication via GSM-R,” in *2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference*, 2006, vol. 6, pp. 3026–3030, doi: 10.1109/VETECS.2006.1683424.
- [10] “¿Qué es el GSM? | Wireless Logic.” <https://www.wirelesslogic.com/es/que-es-gsm/> (accessed Jan. 07, 2024).
- [11] “Home | UIC - International union of railways.” <https://uic.org/> (accessed Dec. 18, 2023).
- [12] Ingeniería, “ARQUITECTURA SISTEMA GSM-R Y TREN TIERRA - Mostoles Chamartin.”
- [13] “El Sistema Global de Comunicaciones Móviles para Ferrocarriles, GSM-R.”
<https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=332> (accessed Dec. 18, 2023).
- [14] “GSM-R: a migration strategy to its successor? - Rail Engineer.”
<https://www.railengineer.co.uk/gsm-r-a-migration-strategy-to-its-successor/> (accessed Jan. 07, 2024).
- [15] “FRMCS: More than just a successive replacement for GSM-R.”
<https://www.globalrailwayreview.com/article/100190/frmcs-more-than-replacement-gsmr/>
(accessed Jan. 07, 2024).

- [16] “Evolving beyond GSM-R with 5G-oriented FRMCS.”
<https://www.globalrailwayreview.com/article/135340/huawei-lte-frmcs/> (accessed Jan. 07, 2024).
- [17] “Inicio - Adif.” <https://www.adif.es/inicio> (accessed Dec. 18, 2023).
- [18] “20190424 Guía Técnica GSM-R | PDF | Antena (Radio) | Gsm.”
<https://es.scribd.com/document/440380276/20190424-Guia-Tecnica-GSM-R> (accessed Dec. 18, 2023).
- [19] “Functional Requirements Specification Version 8.0.0,” 2015.
- [20] “Mobile Radio for Railway Networks in Europe | TRIMIS.”
<https://trimis.ec.europa.eu/project/mobile-radio-railway-networks-europe> (accessed Dec. 18, 2023).
- [21] “Automotores eléctricos S-450 y S-451.” <https://www.renfe.com/es/fr/groupe-renfe/groupe-renfe/flotte-de-trains/450-451> (accessed Jan. 08, 2024).
- [22] “Handover en Telecomunicaciones | PDF | Gestión de recursos de radio | Ingeniería Electrónica.” <https://es.scribd.com/document/95913280/Handover-en-Telecomunicaciones> (accessed Dec. 18, 2023).
- [23] “HTZ Communications -Radio network planning and optimisation ATDI.”
<https://atdi.com/products-and-solutions/htz-communications/> (accessed Dec. 18, 2023).
- [24] “LiDAR | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.”
<https://www.mitma.gob.es/instituto-geografico-nacional/observacion-del-territorio/lidar> (accessed Dec. 18, 2023).
- [25] M. Hata, “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 29, no. 3, pp. 317–325, 1980, doi: 10.1109/T-VT.1980.23859.
- [26] “Sector de Radiocomunicaciones (UIT-R).” <https://www.itu.int/es/ITU-R/Pages/default.aspx> (accessed Dec. 18, 2023).
- [27] “Kathrein Solutions - Your Partner in RFID, AutoID, IoT, EVR & AVI.” <https://www.kathrein-solutions.com/> (accessed Jan. 08, 2024).
- [28] “Kathrein 742271-V03 | PDF | Antenna (Radio) | Decibel.”
<https://es.scribd.com/doc/144360352/Kathrein-742271-V03> (accessed Dec. 18, 2023).
- [29] “Kathrein 741785 | PDF | Antenna (Radio) | Decibel.”
<https://es.scribd.com/doc/62470620/Kathrein-741785> (accessed Dec. 18, 2023).
- [30] “EUR-Lex - I24133 - EN - EUR-Lex.” <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/radio-frequencies-european-radio-communications-committee.html>

- (accessed Dec. 18, 2023).
- [31] “ARFCN - Telecom ABC.” <https://www.telecomabc.com/a/arfcn.html> (accessed Dec. 18, 2023).
- [32] “Absolute radio-frequency channel number - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Absolute_radio-frequency_channel_number (accessed Dec. 18, 2023).
- [33] “Specification # 05.05.” <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=258> (accessed Dec. 18, 2023).
- [34] “Erlang B Formula - Definition & Meaning | Operations Overview | MBA Skool.” <https://www.mbaskool.com/business-concepts/operations-logistics-supply-chain-terms/3806-erlang-b-formula.html> (accessed Dec. 18, 2023).
- [35] “ETCS Levels and Modes - European Commission.” https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-ertms-and-how-does-it-work/etcs-levels-and-modes_en (accessed Dec. 18, 2023).
- [36] “¿Qué es el modelo OSI? | Ejemplos de modelos OSI | Cloudflare.” <https://www.cloudflare.com/es-es/learning/ddos/glossary/open-systems-interconnection-model-osi/> (accessed Dec. 18, 2023).
- [37] Ingeniería, “Sistema de Comunicaciones Fijas,” p. 46, 2023.
- [38] “El tendido de fibra óptica en la línea convencional de Adif entre Valencia y Sagunto será soterrado mejorando su operatividad.” <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=2334> (accessed Jan. 08, 2024).
- [39] “SET DE ARMARIOS DE SEÑALES FERROVIARIAS - MFTRAIN - N83020 - ESCALA N.” <https://tras-tren.com/decoracion-n/3343-set-de-armarios-de-senales-ferroviarias-mftrain-n83020-escala-n.html> (accessed Jan. 08, 2024).
- [40] “Agencia Ferroviaria de la Unión Europea (ERA) | Unión Europea.” https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/european-union-agency-railways-era_es (accessed Dec. 18, 2023).
- [41] “ETSI - Welcome to the World of Standards!” <https://www.etsi.org/> (accessed Dec. 18, 2023).
- [42] Tarazona Lizarraga, C. Análisis de las Necesidades de una Smart City en el Marco de un Desarrollo Sostenible; Universitat Oberta de Catalunya: Barcelona, Spain, 2020.
- [43] Villar Miguelez, C.; Monzon Baeza, V.; Parada, R.; Monzo, C. Guidelines for Renewal and Securitization of a Critical Infrastructure Based on IoT Networks. Smart Cities 2023, 6, 728-

743. <https://doi.org/10.3390/smartcities6020035>
- [44] J. M. Fernández Perrino, “Renovación de las líneas ferroviarias para el transporte inteligente de mercancías,” 2021.
- [45] Garau Guzman, J.; Baeza, V.M. Enhancing Urban Mobility through Traffic Management with UAVs and VLC Technologies. Drones 2024, 8, 7. <https://doi.org/10.3390/drones8010007>
- [46] Garau Guzmán, J. Gestión del tráfico mediante UAV y VLC. Master’s Thesis, Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, Spain, 2020.
- [47] C. Villar Miguélez, “Renovación y securización de una infraestructura crítica basada en redes IoT,” 2021.
- [48] N. Cañadilla Fernández-Layos, “Análisis y desarrollo de la semántica aplicada a las estaciones ferroviarias en Ciudades Inteligentes,” 2020.

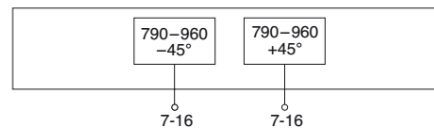
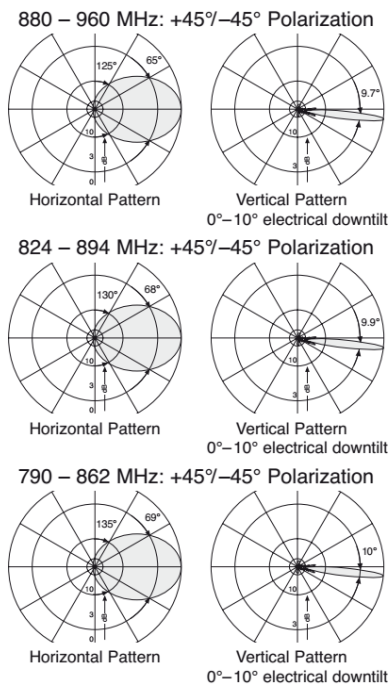
7. Anexos

7.1. Datasheet antenna Kathrein X65

Panel 790-960
Dual Polarization X
Half-power Beam Width 65°
Adjust. Electr. Downtilt 0°-10°
 set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)
XPol Panel 790-960 65° 16.5dBi 0°-10°T

KATHREIN
Antennen · Electronic

Type No.	80010634v01		
Frequency range	790 – 862 MHz	790-960 824 – 894 MHz	880 – 960 MHz
Polarization	+45°, -45°	+45°, -45	+45°, -45°
Gain (dBi)	16.2 ... 16.4 ... 16.2	16.3 ... 16.6 ... 16.3	16.6 ... 16.8 ... 16.6
Tilt	0° ... 5° ... 10°	0° ... 5° ... 10°	0° ... 5° ... 10°
Horizontal Pattern:			
Half-power beam width	69°	68°	65°
Front-to-back ratio (180°±30°)	> 24 dB	> 25 dB	> 25 dB
Cross polar ratio			
Main direction 0°	Typically: 20 dB	Typically: 20 dB	Typically: 20 dB
Sector ±60°	> 10 dB	> 10 dB	> 10 dB
Tracking, Avg.	0.5 dB		
Squint	±1.5°		
Vertical Pattern:			
Half-power beam width	10°	9.9°	9.7°
Electrical tilt	0°-10°, continuously adjustable		
Sidelobe suppression for first sidelobe above main beam	0° ... 5° ... 10° T 18 ... 18 ... 18 dB	0° ... 5° ... 10° T 18 ... 18 ... 18 dB	0° ... 5° ... 10° T 18 ... 18 ... 18 dB
Isolation, between ports	> 30 dB		
Impedance	50 Ω		
VSWR	< 1.5		
Intermodulation IM3	< -150 dBc (2 x 43 dBm carrier)		
Max. power per input	400 W (at 50 °C ambient temperature)		



Mechanical specifications	
Input	2 x 7-16 female
Connector position	Rearside
Adjustment mechanism	1x, Position bottom continuously adjustable
Wind load	Frontal: 680 N (at 150 km/h) Lateral: 310 N (at 150 km/h) Rearside: 900 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Height/width/depth	1934 / 259 / 99 mm
Category of mounting hardware	M (Medium)
Weight	11 kg / 13 kg (clamps incl.)
Packing size	2216 x 272 x 147 mm
Scope of supply	Panel and 2 units of clamps for 50 – 115 mm diameter

936.3816/c Subject to alteration.

Internet: www.kathrein.de

80010634v01 Page 1 of 2

KATHREIN-Werke KG · Anton-Kathrein-Straße 1 – 3 · P.O. Box 10 04 44 · 83004 Rosenheim · Germany · Phone +49 8031 184-0 · Fax +49 8031 184-973

Accessories General Information

KATHREIN
Antennen · Electronic

Accessories

Type No.	Description	Remarks	Weight approx.	Units per antenna
738546	1 clamp	Mast: 50 – 115 mm diameter	1.0 kg	2 (included in the scope of supply)
731651	1 clamp	Mast: 28 – 60 mm diameter	0.8 kg	2 (order separately if required)
85010002	1 clamp	Mast: 110 – 220 mm diameter	2.7 kg	2 (order separately if required)
85010003	1 clamp	Mast: 210 – 380 mm diameter	4.8 kg	2 (order separately if required)
737975	1 downtilt kit	Downtilt angle: 0° – 11°	2.8 kg	1 (order separately if required)

For downtilt mounting use the clamps for an appropriate mast diameter together with the downtilt kit.

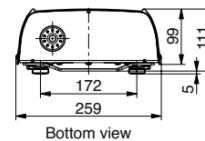
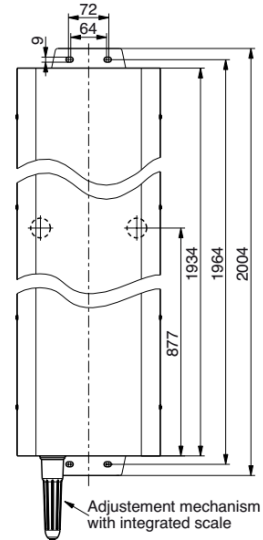
Material:
Reflector screen: Weather-proof aluminum.
Fiberglass radome: The grey fiberglass radomes of these antennas are very stable and extraordinarily stiff. They are resistant to ultraviolet radiation and can also be painted to match their surroundings.
All screws and nuts: Stainless steel.

Grounding: The metal parts of the antenna including the mounting kit and the inner conductors are DC grounded.

Environmental conditions: Kathrein cellular antennas are designed to operate under the environmental conditions as described in ETS 300 019-1-4 class 4.1 E. The antennas exceed this standard with regard to the following items:
 – Low temperature: –55 °C
 – High temperature (dry): +60 °C

Ice protection: Due to the very sturdy antenna construction and the protection of the radiating system by the radome, the antenna remains operational even under icy conditions.

Environmental tests: Kathrein antennas have passed environmental tests as recommended in ETS 300 019-2-4. The homogenous design of Kathrein's antenna families use identical modules and materials. Extensive tests have been performed on typical samples and modules.



Please note:

As a result of more stringent legal regulations and judgements regarding product liability, we are obliged to point out certain risks that may arise when products are used under extraordinary operating conditions.

The mechanical design is based on the environmental conditions as stipulated in ETS 300 019-1-4 and thereby respects the static mechanical load imposed on an antenna by wind at maximum velocity. Wind loads are calculated according to DIN 1055-4. Extraordinary operating conditions, such as heavy icing or exceptional dynamic stress (e.g. strain caused by oscillating support structures), may result in the breakage of an antenna or even cause it to fall to the ground. These facts must be considered during the site planning process.

The installation team must be properly qualified and also be familiar with the relevant national safety regulations.

The details given in our data sheets have to be followed carefully when installing the antennas and accessories.

The limits for the coupling torque of RF-connectors, recommended by the connector manufacturers must be obeyed.

Any previous datasheet issues have now become invalid.



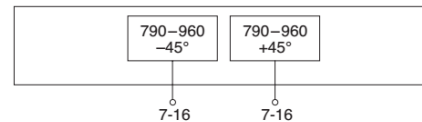
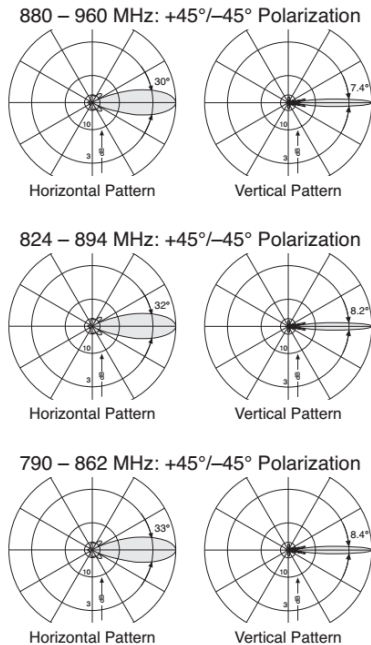
7.2. Datasheet antenna Kathrein X30

Panel	790-960
Dual Polarization	X
Half-power Beam Width	30°
Fixed Electrical Downtilt	0°

KATHREIN
Antennen · Electronic

XPol Panel 790-960 30° 21dBi 0°T

Type No.	80010643		
	790-960		
Frequency range	790 – 862 MHz	824 – 894 MHz	880 – 960 MHz
Polarization	+45°, -45°	+45°, -45°	+45°, -45°
Gain at 0° T	2 x 20.2 dBi	2 x 20.4 dBi	2 x 20.8 dBi
Horizontal Pattern:			
Half-power beam width	33°	32°	30°
Front-to-back ratio, copolar	> 30 dB	> 30 dB	> 30 dB
Cross polar ratio			
Maindirection	0°	Typically: 30 dB	Typically: 26 dB
Tracking, Avg.		2.0 dB	Typically: 23 dB
Squint		±2.0°	
Vertical Pattern:			
Half-power beam width	8..4°	8.2°	7.4°
Sidelobe suppression for first sidelobe above main beam	> 15 dB	> 15 dB	> 15 dB
Impedance	50 Ω		
VSWR	< 1.5		
Isolation, between ports	> 30 dB		
Intermodulation IM3	< -150 dBc (2 x 43 dBm carrier)		
Max. power per input	500 W (at 50 °C ambient temperature)		



Mechanical specifications	
Input	2 x 7-16 female
Connector position	Rearside
Wind load	Frontal: 1760 N (at 150 km/h) Lateral: 330 N (at 150 km/h) Rearside: 2040 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Height/width/depth	2254 / 576 / 99 mm
Category of mounting hardware	H (Heavy)
Weight	20.5 kg / 22.5 kg (clamps incl.)
Packing size	2536 x 592 x 147 mm
Scope of supply	Panel and 2 units of clamps for 42 – 115 mm diameter

936.4149/a Subject to alteration.

Accessories General Information

KATHREIN
Antennen · Electronic

Accessories

Type No.	Description	Remarks	Weight approx.	Units per antenna
738546	1 clamp	Mast: 42 – 115 mm diameter	1.1 kg	2 (included in the scope of supply)
85010002	1 clamp	Mast: 110 – 220 mm diameter	2.7 kg	2 (order separately if required)
85010003	1 clamp	Mast: 210 – 380 mm diameter	4.8 kg	2 (order separately if required)
85010008	1 downtilt kit	Downtilt angle: 0° – 10°	6.5 kg	1 (order separately if required)

For downtilt mounting use the clamps for an appropriate mast diameter together with the downtilt kit.

Material:

Reflector screen: Weather-proof aluminum.

Fiberglass radome: The grey fiberglass radomes of these antennas are very stable and extraordinarily stiff. They are resistant to ultraviolet radiation and can also be painted to match their surroundings.

All screws and nuts: Stainless steel.

Grounding:

The metal parts of the antenna including the mounting kit and the inner conductors are DC grounded.

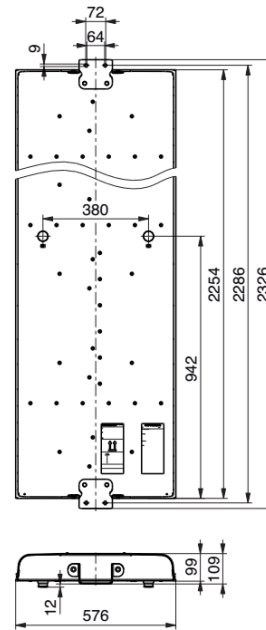
Environmental conditions:

Kathrein cellular antennas are designed to operate under the environmental conditions as described in ETS 300 019-1-4 class 4.1 E. The antennas exceed this standard with regard to the following items:
– Low temperature: –55 °C
– High temperature (dry): +60 °C

Ice protection: Due to the very sturdy antenna construction and the protection of the radiating system by the radome, the antenna remains operational even under icy conditions.

Environmental tests:

Kathrein antennas fulfil the stated specifications after completion of the environmental tests as defined in ETS 300 019-2-4. The homogenous design of Kathrein's antenna families uses identical modules and materials. Extensive tests have been performed on typical samples and modules.



Bottom view

Please note:

As a result of more stringent legal regulations and judgements regarding product liability, we are obliged to point out certain risks that may arise when products are used under extraordinary operating conditions.

The mechanical design is based on the environmental conditions as stipulated in ETS 300 019-1-4 and thereby respects the static mechanical load imposed on an antenna by wind at maximum velocity. Wind loads are calculated according to DIN 1055-4. Extraordinary operating conditions, such as heavy icing or exceptional dynamic stress (e.g. strain caused by oscillating support structures), may result in the breakage of an antenna or even cause it to fall to the ground. These facts must be considered during the site planning process.

The installation team must be properly qualified and also be familiar with the relevant national safety regulations.

The details given in our data sheets have to be followed carefully when installing the antennas and accessories.

The limits for the coupling torque of RF-connectors, recommended by the connector manufacturers must be obeyed.

Any previous datasheet issues have now become invalid.

