



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

ÁREA DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES

**ESTUDIO DE UN CASO PRÁCTICO DE IMPLEMENTACIÓN DE
UN SISTEMA DE COMUNICACIONES GSM-R SOBRE
INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS DE ALTA VELOCIDAD**

CASTRILLO MARTÍNEZ, David

**TUTOR: ÁLVAREZ LÓPEZ, Yuri
COTUTOR: GUTIÉRREZ CANTARERO, Rafael**

FECHA: 22 DE JULIO DE 2022

Índice

| | <i>Página</i> |
|-------|--|
| 1 | Introducción 10 |
| 1.1 | Sistema ferroviario español 10 |
| 1.2 | Antecedentes de sistemas de seguridad en el sector ferroviario español: ASFA 13 |
| 1.3 | Sistema europeo de gestión de tráfico ferroviario: ERTMS..... 15 |
| 1.4 | Sistema de señalización: ETCS 16 |
| 1.5 | Centro de bloqueo por radio (RBC)..... 18 |
| 1.6 | Sistema GSM-R 18 |
| 1.6.1 | Arquitectura general del sistema 18 |
| 1.6.2 | Plan de frecuencias 20 |
| 1.6.3 | Redundancia 21 |
| 1.6.4 | Cobertura radioeléctrica 23 |
| 1.6.5 | Limitaciones del sistema 24 |
| 1.7 | Niveles ETCS 25 |
| 1.8 | Contexto del presente TFM 29 |
| 1.9 | Objetivos del presente TFM 30 |
| 2 | Fase de diseño y planificación del proyecto de comunicaciones GSM-R 31 |
| 2.1 | Estudio de la solución propuesta..... 31 |
| 2.1.1 | Subsistema de obra civil..... 32 |
| 2.1.2 | Subsistema de alimentación..... 32 |
| 2.1.3 | Subsistema de cobertura radioeléctrica 34 |
| 2.1.4 | Subsistema de red de datos..... 36 |
| 2.1.5 | Subsistema de elementos radiantes..... 36 |
| 2.2 | Replanteos y adecuación del proyecto 37 |
| 2.2.1 | Sistema de alimentación – Redundancia y cálculo secciones para caídas de tensión 37 |
| 2.2.2 | Sistema de radiofrecuencia – Medidas de radiofrecuencia (RF)..... 39 |
| 2.2.3 | Obra civil 44 |
| 2.2.4 | Herramienta para geolocalizar fotografías 47 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3 | Ejecución del proyecto de comunicaciones GSM-R..... | 49 |
| 3.1 | Controles de calidad y de los procesos de ejecución | 49 |
| 3.1.1 | Realización de pilotos..... | 49 |
| 3.1.2 | Recepción de acopios de materiales | 52 |
| 3.1.3 | Caracterización de elementos radiantes..... | 53 |
| 3.2 | Trabajos durante las pruebas, validación y puesta en servicio | 68 |
| 3.2.1 | Pruebas durante la instalación | 68 |
| 3.2.2 | Pruebas previas a la puesta en servicio..... | 70 |
| 4 | Seguimiento presupuestario y de programación | 75 |
| 5 | Conclusiones | 78 |
| 6 | Bibliografía..... | 80 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de la red ferroviaria española. Mapa interactivo, disponible en: https://www.adif.es/static-data/mapa/index.html | 12 |
| Figura 2. Baliza ASFA. Fotografía tomada de [3]. | 13 |
| Figura 3. Comunicación entre las señales de vía, las balizas y el enclavamiento mediante ASFA. Figura obtenida de [2]..... | 14 |
| Figura 4. Sistema ERTMS [3],[5]. | 15 |
| Figura 5. Sistemas de seguridad ASFA y ERTMS. Imagen obtenida de [4]. | 16 |
| Figura 6. Ejemplo de eurobalizas instaladas en una vía de ferrocarril. Fotografía obtenida de [3]. | 17 |
| Figura 7. Esquema de la arquitectura general del sistema GSM-R [8]. | 20 |
| Figura 8. Banda de frecuencias GSM-R en MHz. | 20 |
| Figura 9. Esquema de redundancia de una red GSM-R. | 22 |
| Figura 10. Cabina <i>Thalys</i> PBKA. Esquema obtenido de [3]. | 25 |
| Figura 11. Nivel ETCS 0. Imagen obtenida de [3]. | 26 |
| Figura 12. Nivel ETCS 1. Imagen obtenida de [3]. | 27 |
| Figura 13. Nivel ETCS 2. Imagen obtenida de [3]. | 28 |
| Figura 14. Nivel ETCS 3. Imagen obtenida de [3]. | 28 |
| Figura 15. Diagrama de los diferentes subsistemas del sistema GSM-R. | 31 |
| Figura 16. Solución al problema de independencia de alimentación. | 38 |
| Figura 17. Fotografía de una de las campañas de medida de cobertura, con la antena situada a 35 metros. | 40 |
| Figura 18. Perfil de elevación del terreno en el tramo de interés, junto a la línea de visión directa y el elipsoide de Fresnel. | 40 |
| Figura 19. Medidas previas del solape desde el norte. | 41 |
| Figura 20. A la izquierda, máquina para realizar prospecciones geotécnicas. A la derecha, <i>setup</i> del estudio geoelectrico. | 45 |
| Figura 21. Composición del suelo de una zona de interés. | 46 |
| Figura 22. Aplicación JavaScript para geolocalizar fotografías. | 48 |
| Figura 23. Piloto de la instalación de cabeza remota en galería de evacuación. | 50 |
| Figura 24. Cable coaxial superflexible para la instalación en galerías de túneles. | 50 |
| Figura 25. Texto recogido en la ETI de túneles ferroviarios [16]. | 51 |
| Figura 26. Infografía referente al Reglamento de Productos para la Construcción (<i>Construction Product Regulation, CPR</i>) de los cables obtenida de [17]. | 51 |
| Figura 27. Pruebas en fábrica sobre una bobina de cable de energía de 4x35 mm ² | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 28. Extracto del informe de las pruebas del fabricante. | 53 |
| Figura 29. Fotografía en la que se muestra la situación general de la cámara anecoica mientras se prepara una medida. En la parte derecha de la imagen se puede ver el cable radiante montado ya dentro de la cámara anecoica para su medida. | 54 |
| Figura 30. Vista del panel de instrumentación para el control de la cámara anecoica. ... | 55 |
| Figura 31. Fotografía de uno de los sistemas de anclaje empleados para la sujeción de las antenas al posicionador de la antena bajo medida del rango esférico en cámara anecoica del grupo TSC de la Universidad de Oviedo. En este caso, el anclaje corresponde al empleado para la sujeción de la antena de panel. | 55 |
| Figura 32. Fotomontaje con la antena de panel y su diagrama de radiación medido a 900 MHz. | 56 |
| Figura 33. Diagrama de radiación tridimensional de la antena de panel (modelo X65), visto desde diferentes posiciones. Arriba a la izquierda, plano ZY, frontal a la antena; arriba a la derecha, plano XZ, lateral a la antena; abajo a la izquierda, plano XY, desde arriba de la antena. | 57 |
| Figura 34. Antena de panel, modelo X65. Diagrama de radiación para el corte $\varphi = 0^\circ$. Coordenadas cartesianas. | 58 |
| Figura 35. Antena de panel una vez instalada para su medida en el rango esférico en cámara anecoica del grupo TSC de la Universidad de Oviedo. | 58 |
| Figura 36. Fotomontaje con la antena logoperiódica y su diagrama de radiación medido a 900 MHz. | 59 |
| Figura 37. Diagrama de radiación tridimensional de la antena logoperiódica, visto desde diferentes posiciones. Arriba a la izquierda, plano ZY, frontal a la antena; arriba a la derecha, plano XZ, lateral a la antena; abajo a la izquierda, plano XY, desde arriba de la antena. | 60 |
| Figura 38. Antena logoperiódica. Diagrama de radiación para el corte $\varphi = 0^\circ$. Coordenadas cartesianas. | 61 |
| Figura 39. Fotomontaje con el cable radiante y su diagrama de radiación medido a 900 MHz. | 61 |
| Figura 40. Diagrama de radiación tridimensional dl cable radiante, visto desde diferentes posiciones. Arriba a la izquierda, plano ZY, frontal a la antena; arriba a la derecha, plano XZ, lateral a la antena; abajo a la izquierda, plano XY, desde arriba de la antena. | 62 |
| Figura 41. Aspecto de un cable radiante con la cubierta retirada. | 62 |
| Figura 42. Efecto del aumento de la longitud de un cable radiante en un espacio confinado de 20 m de largo x 7 m de ancho. Se representa la amplitud del campo radiado, normalizada, en dB. El rectángulo negro indica la ubicación del cable radiante. En el caso del cable radiante de longitud 0 m, el resultado representado corresponde al campo radiado por una fuente puntual. | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 43. Diagramas de radiación del cable radiante medidos en cámara anecoica. Corte en el plano que contiene al eje del cable. Izquierda: resultados para 900 MHz. Derecha: resultados para 1500 MHz. | 65 |
| Figura 44. Campo radiado por el cable radiante de 2 m de longitud (representado por el rectángulo negro) calculado a partir de las medidas realizadas en cámara anecoica, en un dominio de 5 m x 5 m. Izquierda: campo radiado calculado a 900 MHz. Derecha: campo radiado calculado a 1500 MHz. | 65 |
| Figura 45. Medida del parámetro S11 del cable radiante (captura de la pantalla del analizador de espectros portátil empleado para la realización de la medida). | 66 |
| Figura 46. Segmento de 2 m de radiante colocado en el posicionador del rango esférico en cámara anecoica del grupo TSC-UNIOVI para la realización de la medida del campo radiado. | 67 |
| Figura 47. <i>Setup</i> de medida de las pérdidas de retorno para el control de calidad de la instalación. Se conecta a los conectores del sistema radiante que llega hasta las antenas. | 68 |
| Figura 48. Medida del analizador de redes para el cálculo de las pérdidas de retorno. . | 69 |
| Figura 49. Medidas realizadas durante la optimización de una línea de Alta Velocidad. Dos ejemplos de señales con caída curva se han resaltado dentro del rectángulo con trazo discontinuo, mientras que los ejemplos de señales con caída lineal se muestran dentro del rectángulo con trazo continuo. | 71 |
| Figura 50. Detalle y explicación de las medidas en un túnel con cable radiante. | 72 |
| Figura 51. Detalle de las medidas con antenas convencionales. | 73 |
| Figura 52. Esquema que resume las diferencias de radiación entre cable radiante (izquierda) y antenas (derecha) en el interior de un túnel. | 74 |
| Figura 53. Unidad de obra de ejemplo. | 76 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Resumen de los diferentes niveles ETCS [3]. | 29 |
| Tabla 2. Cálculo de la PIRE para la estación base. | 42 |
| Tabla 3. Variables contempladas en el modelo Okumura-Hata. | 43 |

Abreviaturas

| | |
|--------|--|
| ASFA | Anuncio de Señales y Frenado Automático |
| BSC | <i>Base Station Controller</i> (Controlador de Estación Base) |
| BTS | <i>Base Transceiver Station</i> (Estación Base de telefonía móvil) |
| EIRENE | <i>European Integrated Railway Radio Enhanced Network</i> |
| ERA | <i>European Rail Agency</i> (Agencia Ferroviaria Europea) |
| ERTMS | <i>European Rail Traffic Management System</i> (Sistema de gestión europeo de tráfico ferroviario) |
| ETCS | <i>European Train Control System</i> (Sistema de Control Ferroviario Europeo) |
| GIS | <i>Geographic Information System</i> (Sistema de Información Geográfica) |
| GSM-R | <i>Global System for Mobile Communications – Railway</i> |
| PIRE | Potencia Isotrópica Radiada Equivalente |
| RF | Radiofrecuencia |
| RRH | <i>Remote Radio-Head</i> (Cabeza Remota de Radio) |
| SAI | Sistema de Alimentación Ininterrumpida |
| SDH | <i>Synchronous Digital Hierarchy</i> (Jerarquía Digital Síncrona) |
| TFM | Trabajo de Fin de Máster |
| UIC | <i>Union Internationale des Chemins de fer</i> (Unión Internacional de Ferrocarriles) |
| UNE | Norma española (acrónimo de Una Norma Española) |
| UIT | Unión Internacional de Telecomunicaciones |

Resumen

El diseño de un proyecto de telecomunicaciones en el ámbito de las infraestructuras ferroviarias lleva implícito una serie de incertidumbres que no siempre se pueden contemplar en el planteamiento inicial del mismo. Por este motivo, la ejecución de este tipo de proyectos conlleva modificaciones y adaptaciones de diversa índole, con las problemáticas detectadas en el campo.

En este Trabajo Fin de Máster (TFM) se presenta el seguimiento realizado desde la asistencia técnica de un proyecto de un sistema de telecomunicaciones móviles GSM-R, en un entorno complejo a nivel radioeléctrico y constructivo, como es el tramo de la línea de alta velocidad ferroviaria entre León y Pola de Lena (Asturias), denominado también como la Variante de Pajares.

En primer lugar, se realiza una introducción al sector ferroviario y a los sistemas de señalización ferroviaria, que se dedican a la seguridad y gestión de la infraestructura utilizada. Además, se pone en contexto la tecnología de GSM-R, una adaptación a este sector de la tecnología móvil GSM, la primera generación de telefonía comercial digital. El amplio despliegue y cobertura de la tecnología GSM ha motivado su adaptación para su uso como estándar en telecomunicaciones ferroviarias.

A continuación, se describen los diferentes subsistemas dentro de la implementación de un proyecto de GSM-R y el trabajo realizado en cada una de las fases de esta implementación, las cuales comprenden: la planificación, los trabajos de campo y, finalmente, las pruebas previas a la puesta en servicio del sistema de telecomunicaciones.

Finalmente, se hace una descripción cualitativa de cómo funciona el tema presupuestario en las obras, explicando la manera de que el promotor pueda pagar a las empresas contratistas, junto con la definición de algunos términos clave empleados en este tipo de procedimientos.

Abstract

The design of a telecommunications project in the field of railway infrastructure implies a series of uncertainties that cannot always be considered in the initial proposal of the project. Consequently, modifications and updates of different extent are usually associated with the development and execution of these kinds of projects, with the subsequent challenges that need to be addressed.

The supervision and technical solutions adopted within the framework of a GSM-R railway project from the technical assistance office is presented in this Master Thesis. The project has to deal with a complex environment from a radioelectric and civil works point of view, as it is the high-speed railway line between León and Pola de Lena (Asturias), also known as the Variante de Pajares.

First, an introduction to the railway sector and railway signaling systems, which are dedicated to the safety and management of the railway infrastructure, is presented. Besides, the GSM-R technology is presented. This is an adaptation of GSM technology, the first generation of digital mobile telecommunications, to the field of railway communications. One of the motivations leading to the use of GSM for railways is its widespread deployment and coverage.

Next, the different subsystems within the implementation of a GSM-R project are described, together with the work carried out in each of the stages of this implementation of the project. These stages are the project planning, the civil works, and finally, the tests conducted prior to the commissioning of the telecommunications infrastructure.

Finally, a qualitative description of how the budget is calculated for these kinds of civil works is presented. It is explained the way in which the bidder can pay the contractor companies. Several key concepts are defined in order to provide a better understanding of this kind of procedure.

1 Introducción

1.1 Sistema ferroviario español

España cuenta en la actualidad con una red ferroviaria de aproximadamente 15.200 kilómetros de los cuales 11.483 kilómetros pertenecen a la red convencional en ancho ibérico, 2.322 kilómetros a la red de Líneas de Alta Velocidad en ancho internacional UIC (*International Union of Railways*), 119 kilómetros de red mixta, y 1.207 kilómetros de vía estrecha o ancho métrico (Red de Ancho Métrico, RAM) [1].

Las entidades encargadas de la administración de la infraestructura ferroviaria española son ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) y ADIF Alta Velocidad, encargadas respectivamente de la red convencional y de la red de altas prestaciones. RENFE Operadora, es al igual que ADIF, un actor clave dentro del sector, situado como el mayor operador de transporte ferroviario de pasajeros y mercancías por ferrocarril en España. En datos de 2013, RENFE transportó más de 465 millones de pasajeros, así como 19,2 millones de toneladas netas de mercancías. Ambas entidades son parte del Grupo Fomento, del Ministerio de Fomento, bajo el cual recaen las responsabilidades relativas al transporte ferroviario en España [1].

Tanto en lo relativo al transporte de mercancías como de pasajeros, en España se está procediendo a la liberalización del sector, lo que conlleva la participación de empresas privadas en la operación de los servicios de transporte ferroviario, compitiendo con la empresa pública RENFE. En el ámbito de las mercancías, este proceso está más consolidado.

Además, existen en España diferentes entidades ferroviarias de carácter autonómico, encargadas de realizar tareas similares a ADIF y RENFE a nivel regional, como los Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana (FGV), Ferrocarriles de la Generalitat de Cataluña (FGC), Serveis Ferroviaris de Mallorca (SFM), así como Euskotren y EuskalTrenbideSarea (ETS) en el País Vasco, que trasladan diariamente en su conjunto a cerca de 100.000 personas a través de unos 700 kilómetros de vías destinados a este fin [1].

En el ámbito del transporte ferroviario de cercanías, en España se transporta anualmente en torno a más de millón y medio de personas diariamente. Esta red de cercanías discurre en torno a 12 ciudades o áreas metropolitanas, destacando por su volumen de tráfico Madrid, Barcelona, Valencia y Bilbao. A esta red, habría que sumarle los numerosos sistemas de metro, tranvía y metros ligeros en funcionamiento en nuestro país, alcanzando los cerca de 1.000 kilómetros en total.

Una de las características más destacables del sistema ferroviario en España es la convivencia de distintos anchos de vía en su red: el ancho ibérico o convencional de 1.668 milímetros y vigente en la mayor parte de la red ferroviaria española; el ancho estándar, UIC o internacional de 1.435 milímetros presente en las líneas de Alta Velocidad; y el ancho de vía estrecha, que engloba a aquellos menores de 1.435, y que, en particular en España prácticamente es ancho métrico (1.000 mm). Ante esta particular característica de nuestra red ferroviaria, la industria española, liderada por los principales fabricantes de material rodante nacionales, ha desarrollado sistemas de cambio de ancho de vía, que permiten a trenes de pasajeros ser compatibles para su uso en los dos principales anchos, el internacional y el convencional.

Otro aspecto que define la actual red ferroviaria española es su red de Alta Velocidad. Tras varias décadas de funcionamiento, con la puesta en marcha de la primera línea que une Madrid y Sevilla en el año 1992, esta red ha permitido a España disponer de uno de los más modernos y avanzados modos de transporte existentes en la actualidad, situando a nuestro país a la vanguardia mundial y como referente en la materia para multitud de países que pretenden implementar y desarrollar sistemas o infraestructuras ferroviarias similares.

Esta red de Alta Velocidad española cuenta en la actualidad con 2.322 kilómetros de líneas de alta velocidad en ancho UIC en explotación comercial y más de 2.000 kilómetros en fase de estudio, planificación o construcción, y que la sitúa como la más extensa en kilómetros en explotación de Europa y la tercera del mundo, tras China y Japón. Más de 120 millones de personas han viajado en los más de 300 trenes de Alta Velocidad que dan servicio a casi 100.000 usuarios diariamente conectando cerca de 80 municipios españoles, sirviendo como elemento clave en la mejora de la vertebración del país y de la

calidad de vida de los ciudadanos. Todo este desarrollo en el ámbito de la Alta Velocidad ha situado igualmente nuestra industria como referente mundial en la materia, tanto en el diseño, construcción, gestión y mantenimiento de las infraestructuras y el material rodante, como por el amplio abanico de empresas que mediante sus distintos productos y servicios ofertados, son capaces hoy en día de atender cualquier tipo de demanda del sector ferroviario en cualquier lugar del mundo, con máximas garantías de calidad, fiabilidad y relación entre calidad y precio. En relación a la señalización de infraestructuras ferroviarias, España es el país europeo con mayor grado de implantación del sistema europeo de señalización ERTMS (*European Traffic Management System*). El ERTMS es un sistema de mando y control de trenes pensado para avanzar en la interoperabilidad facilitando la compatibilidad entre señalización y comunicaciones entre infraestructura de vía y equipos de a bordo. Más de 2.000 kilómetros de nuestra red están equipados con este sistema, el más moderno y avanzado hasta la fecha. España cuenta también con el trayecto más largo interoperable de Europa. Se trata del recorrido entre Barcelona y Málaga que está equipado con ERTMS [1].

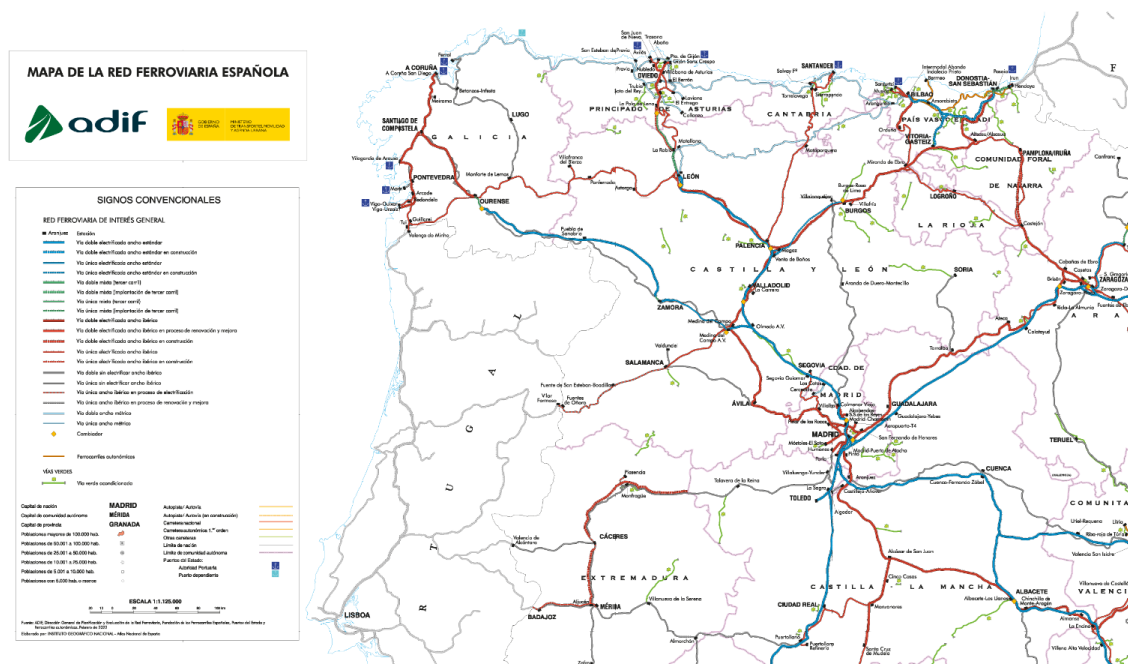


Figura 1. Mapa de la red ferroviaria española. Mapa interactivo, disponible en: <https://www.adif.es/static-data/mapa/index.html>

1.2 Antecedentes de sistemas de seguridad en el sector ferroviario español: ASFA

En la red ferroviaria española, al igual que en otras redes ferroviarias europeas, se hizo necesario el desarrollo e implantación de sistemas de seguridad que informen sobre el estado de la vía. El desarrollo de este sistema fue encargado por RENFE en los años 70, dando como resultado el sistema ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático). Al haberse desarrollado con posterioridad a los sistemas de seguridad de otros países europeos, el ASFA pudo incorporar algunas mejoras e innovaciones tecnológicas.

El sistema ASFA se fue implantando en las líneas de RENFE de forma progresiva. Actualmente está también ampliamente desplegado en las redes de ancho métrico (líneas de la antigua red de Ferrocarriles de Vía Estrecha, FEVE).

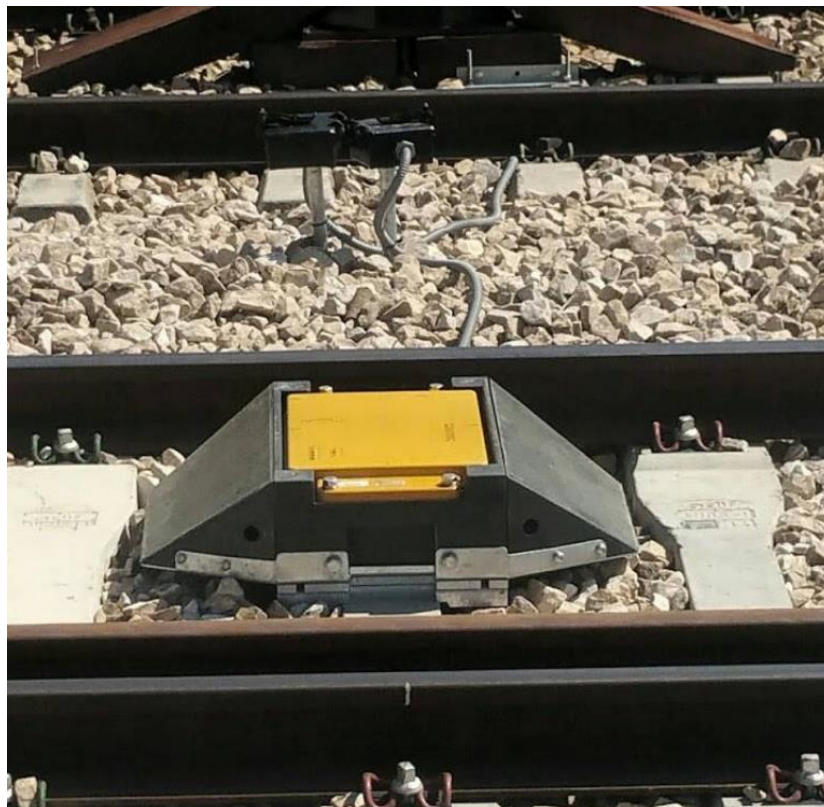


Figura 2. Baliza ASFA. Fotografía tomada de [3].

El funcionamiento de ASFA se basa en el aviso al maquinista sobre el estado de las señales de la vía mediante el uso de señales luminosas y acústicas en la cabina del tren. Por ejemplo, en caso de que se anuncie una reducción de velocidad y no obedezca el conductor, el sistema actúa y frena al tren. El esquema de funcionamiento y las diferentes comunicaciones llevadas a cabo en el sistema ASFA se ilustran en la Figura 3.

A partir de 2005 se inició por parte de ADIF la renovación del sistema ASFA, dando lugar al ASFA Digital [2]. Si bien el equipo de procesado de las señales a bordo del tren pasa a ser digital, las balizas de la vía siguen transmitiendo su información de forma analógica. En todo caso, la principal limitación del sistema ASFA es la no compatibilidad o interoperabilidad con los sistemas de seguridad de otros países de la Unión Europea. Ello ha motivado el desarrollo de sistemas de seguridad y señalización estandarizados para los países de la Unión Europea, que posibilite la interconexión de las redes de alta velocidad de cada país [1],[2].

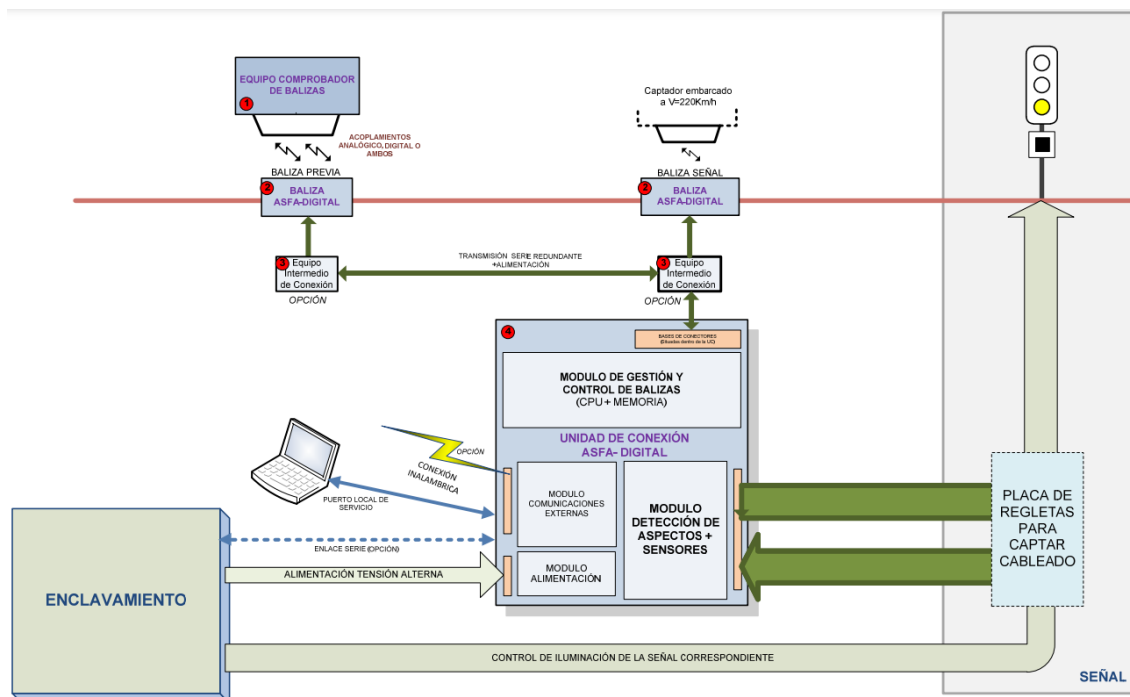


Figura 3. Comunicación entre las señales de vía, las balizas y el enclavamiento mediante ASFA. Figura obtenida de [2].

1.3 Sistema europeo de gestión de tráfico ferroviario: ERTMS

El Sistema de gestión europeo de tráfico ferroviario (*European Rail Traffic Management System*, ERTMS) es el sistema de estándares para la gestión e interoperabilidad de señalización en el tráfico ferroviario en la Unión Europea [3].

Este sistema está desarrollado por la Agencia Ferroviaria de la Unión Europea (*European Railway Agency*, ERA), que vela por la seguridad y la interoperabilidad ferroviaria entre los distintos estados miembros de la Unión. Este organismo tiene la función de unificar los principales reglamentos técnicos y las normas nacionales de seguridad en el ámbito ferroviario, de carácter bastante heterogéneo, y establecer progresivamente los objetivos de seguridad comunes a todos los sistemas nacionales de ferrocarriles de la Unión Europea de forma que se pueda habilitar el funcionamiento pleno de un único espacio ferroviario europeo.

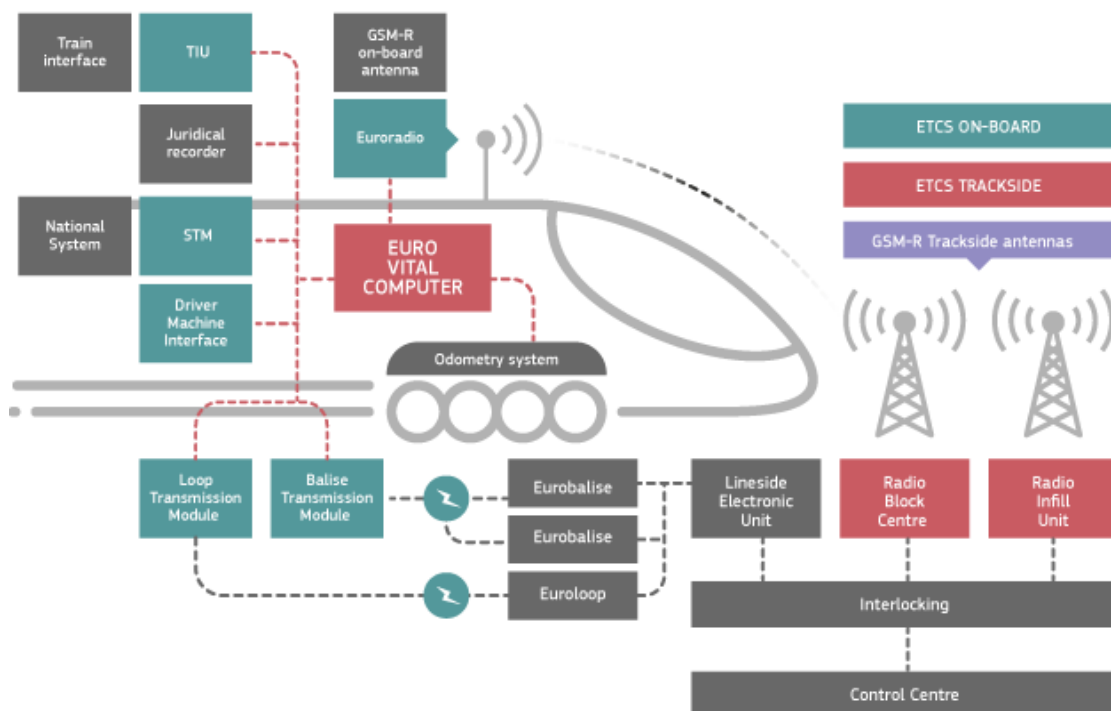


Figura 4. Sistema ERTMS [3],[5].

De esta manera, el principal objetivo de ERTMS es promover la interoperabilidad del tráfico ferroviario en la Unión Europea, poniendo especial énfasis en aumentar la seguridad, mejorar la eficiencia globalmente y mejorar la interoperabilidad ferroviaria entre las fronteras de los diferentes estados miembros. Esto supone que se tienen que reemplazar los diferentes sistemas de señalización y procedimientos operacionales de cada país con un nuevo estándar a nivel europeo para el control y los sistemas de mando ferroviarios. ERTMS está compuesto por un sistema de señalización (ETCS) y otro de comunicaciones (GSM-R).

En la Figura 5 se muestra, de forma esquemática, las diferencias entre los sistemas ASFA y ERTMS.

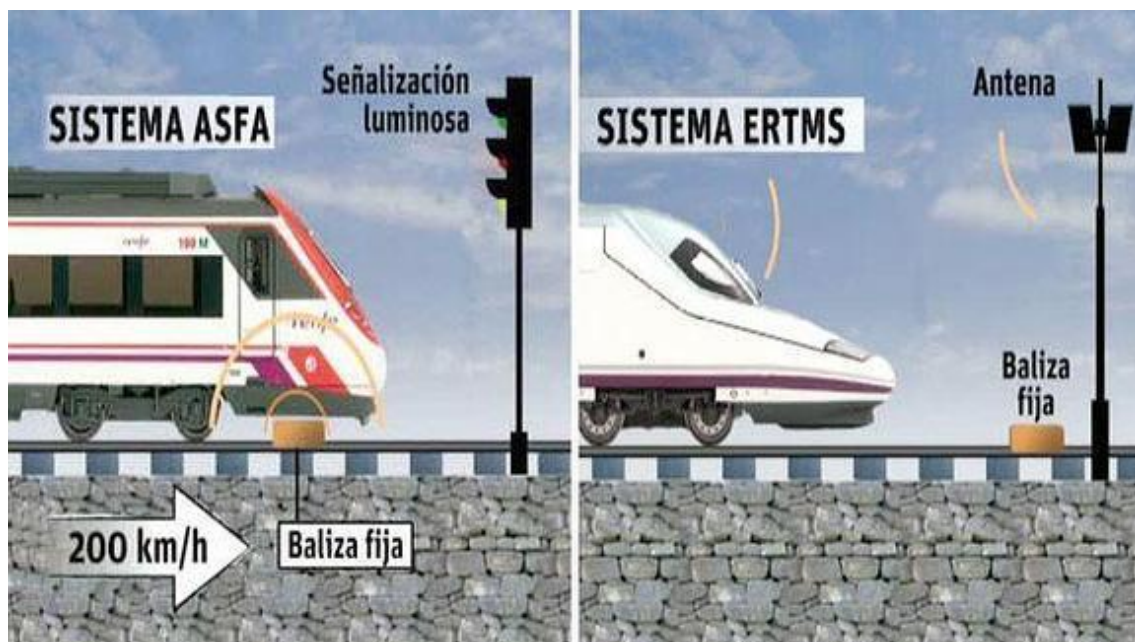


Figura 5. Sistemas de seguridad ASFA y ERTMS. Imagen obtenida de [4].

1.4 Sistema de señalización: ETCS

El Sistema de Control Ferroviario Europeo (*European Train Control System*, ETCS) es un sistema de protección automático para el tren, que sirve de reemplazo a los diversos y

antiguos sistemas de protección instalados en los diferentes países europeos, muchos de ellos incompatibles entre sí [5],[6].

El sistema ETCS está implementado con equipamiento situado en las vías, enclavamientos y en las cabinas de los trenes. En su versión más sofisticada, esta interacción entre los sistemas se produce de manera inalámbrica, de manera que el maquinista dentro del tren puede obtener toda la información necesaria sin tener que observar las señales de información situadas a la orilla de las vías. Esto implica que toda la información generada puede servir de base para una conducción autónoma del tren o sistemas de frenado automático, por ejemplo.



Figura 6. Ejemplo de eurobalizas instaladas en una vía de ferrocarril. Fotografía obtenida de [3].

1.5 Centro de bloqueo por radio (RBC).

El centro de bloqueo por radio (*Radio Block Center*, RBC) es un dispositivo informático que tiene como finalidad comunicar y transmitir información vital al tren con respecto a la circulación, permitiendo la automatización del mismo, sin presencia de un maquinista [7]. Por un lado, toma los datos de los elementos propios de la vía mediante los enclavamientos. Y, por otro lado, es capaz de comunicarse con los trenes mediante una interfaz radio, con lo que éstos están en comunicación durante todo el viaje.

Proporciona datos geográficos específicos de la vía ferroviaria y claves criptográficas de los trenes que circulan, en este sentido, determina la ubicación, velocidad, dirección de desplazamiento y distancia de frenado. Esta información permite que el RBC pueda calcular el área de ocupación de cada uno de los trenes que circula en la vía, ajustar su velocidad y evitar colisiones inesperadas, dando como resultado al *moving block*, (sistema de señalización automática que define los tramos de circulación segura, en tiempo real, comunicando el sistema de señalización central y el sistema de señalización de la cabina del tren), dando como resultado el aumento de la capacidad de tránsito de la línea férrea.

1.6 Sistema GSM-R

1.6.1 Arquitectura general del sistema

El sistema GSM – R (*Global System for Mobile Communications – Railway*) [8],[9] sigue básicamente la arquitectura definida para un sistema GSM tradicional, establecida por los documentos de aplicación de los estándares europeos del sector ferroviario. Sobre esta base, se añadirán diferentes módulos y dispositivos que dotarán al sistema de las funcionalidades necesarias para cubrir los servicios demandados por las líneas ferroviarias.

Desde el punto de vista funcional, el sistema se estructurará en los siguientes subsistemas:

- El subsistema de estaciones móviles (*Mobile System*, MS).
- El subsistema de estaciones base (*Base Station Subsystem*, BSS).

- El subsistema de red y conmutación (*Network and Switching Subsystem, NSS*).
- El subsistema de operación y mantenimiento (*Operation and Management Subsystem, OMSS*).

El objeto de la ejecución del proyecto de GSM-R, cuyo esquema general se muestra en la Figura 7, es la instalación y la puesta en marcha del equipamiento de red GSM-R correspondiente al subsistema de estaciones base (BSS), compuesto por estaciones base (BTS), repetidores, controladoras de estaciones base (BSC), Unidades de Transcodificación y Adaptación de la Velocidad de Transmisión (TCU/TRAU), equipos terminales portátiles, consola de comunicaciones y sistema de supervisión y gestión radio.

Las estaciones base se equiparán con tantos transmisores activos como se haya determinado en el anejo de estudio de tráfico, tanto para emplazamientos tipo con o sin cambio de RBC como para emplazamientos específicos con características de carga de tráfico concretas. En todo caso, para todos los emplazamientos se dejará un transmisor de reserva, en *stand by*, dotando así de redundancia a la BTS en caso de fallo de un transmisor. Igualmente, en todos los casos se utilizará un Combinador / Duplexor con capacidad de hasta cuatro transmisores por celda.

Las BSC y TCU/TRAU para los tres tramos, están instaladas en Zaragoza y Atocha, donde se encuentran ubicadas las MSC de capa A y B, respectivamente, que es donde terminan los circuitos E1 que lleven los canales de la interfaz A, comunicando las TCU/TRAU con las MSC correspondientes.

Ambos equipos (BSC y TCU/TRAU) están conectados al sistema de alimentación ininterrumpida existente, para asegurar su funcionamiento en caso de fallo en el sistema de alimentación primario.

La conexión entre las BSC y las estaciones base se realiza mediante el sistema de comunicaciones fijas SDH, creando anillos entre las diferentes estaciones base.

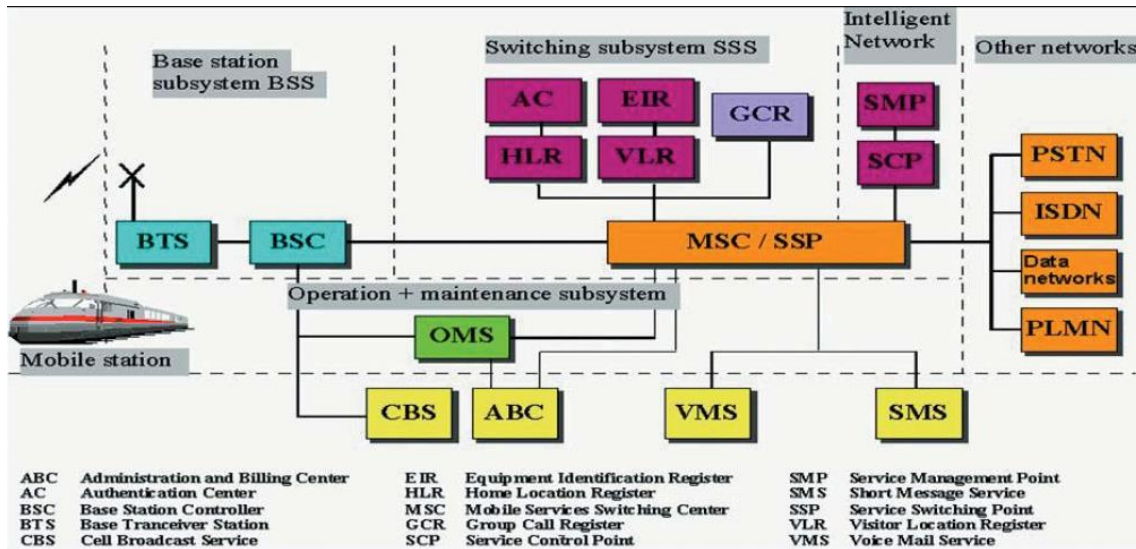


Figura 7. Esquema de la arquitectura general del sistema GSM-R [8].

1.6.2 Plan de frecuencias

La banda de frecuencias reservada para el sistema GSM - R tiene un ancho de banda de 4 MHz en el rango de 900 MHz. Dicha banda ha sido recomendada por el ERC (*European Radiocommunications Committee*) como la banda de frecuencia para las redes móviles privadas del UIC (*Union Internationale des Chemins de Fer*). Tal recomendación ha sido recogida en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias que se muestra en la Figura 8.

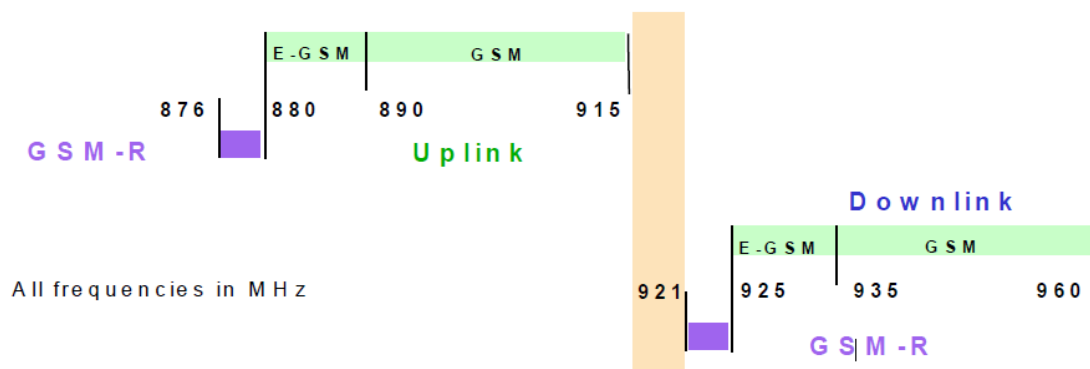


Figura 8. Banda de frecuencias GSM-R en MHz.

Las frecuencias de las portadoras en el enlace ascendente van desde 876,2 MHz hasta 879,8 MHz, mientras que en el enlace descendente se distribuyen desde 921,2 MHz a 924,8 MHz. Esta estructura proporciona un sistema dúplex por división en frecuencia, con 45 MHz de separación entre las dos sub-bandas, siendo el espaciado entre portadoras de 200 kHz. Considerando la banda de guarda de 200 kHz se obtiene un total de 19 canales disponibles.

Los niveles de potencia de la señal interferente y la portadora determinan la calidad de servicio, que en el caso de señales digitales se corresponde con la tasa de error (*bit error rate*, BER). Por interferencia se entiende el efecto que una señal, interferente, más o menos próxima en el espectro, provoca en la que está siendo utilizada como canal de comunicación, portadora. Ese efecto puede variar entre una mera disminución en la calidad de la señal y una degradación tal, que sea inviable mantener una comunicación.

La optimización del espectro haciendo uso de la reutilización de frecuencias tiene como contrapartida un mayor nivel de señal interferente y, por lo tanto, el plan de frecuencias deberá buscar un compromiso entre la reutilización de frecuencias y la relación portadora – señal interferente.

1.6.3 Redundancia

La red GSM-R se diseña tratando de minimizar al máximo el número de puntos singulares de fallo. De esta forma, se trata de garantizar la fiabilidad del sistema gracias a dos capas de red totalmente independientes, que incluye, además dos sistemas redundantes e independientes para la red fija.

El concepto de cobertura de capa doble es el que determinará la ubicación de los emplazamientos de acuerdo a dicha arquitectura de red. Así, es necesario escalonar los emplazamientos de ambas capas de tal forma que un emplazamiento perteneciente a la Capa A se encuentre situado entre dos emplazamientos pertenecientes a la Capa B, y viceversa, como se puede observar en el esquema de la Figura 9. Esta alternancia de emplazamientos queda supeditada a la orografía del terreno y a las instalaciones

existentes, que también pueden impedir la alternancia del lado de vía en el que deberían construirse emplazamientos adyacentes.

Ambas capas se diseñan para proporcionar cobertura a la zona definida. Como se puede comprobar en la Figura 9, cada capa tiene que cumplir independientemente con todos los requerimientos establecidos, tanto a nivel de señal como a nivel de calidad. En el caso de fallo de uno de los elementos de una de las capas, la otra capa tiene que asegurar el rendimiento, tal y como está establecido.

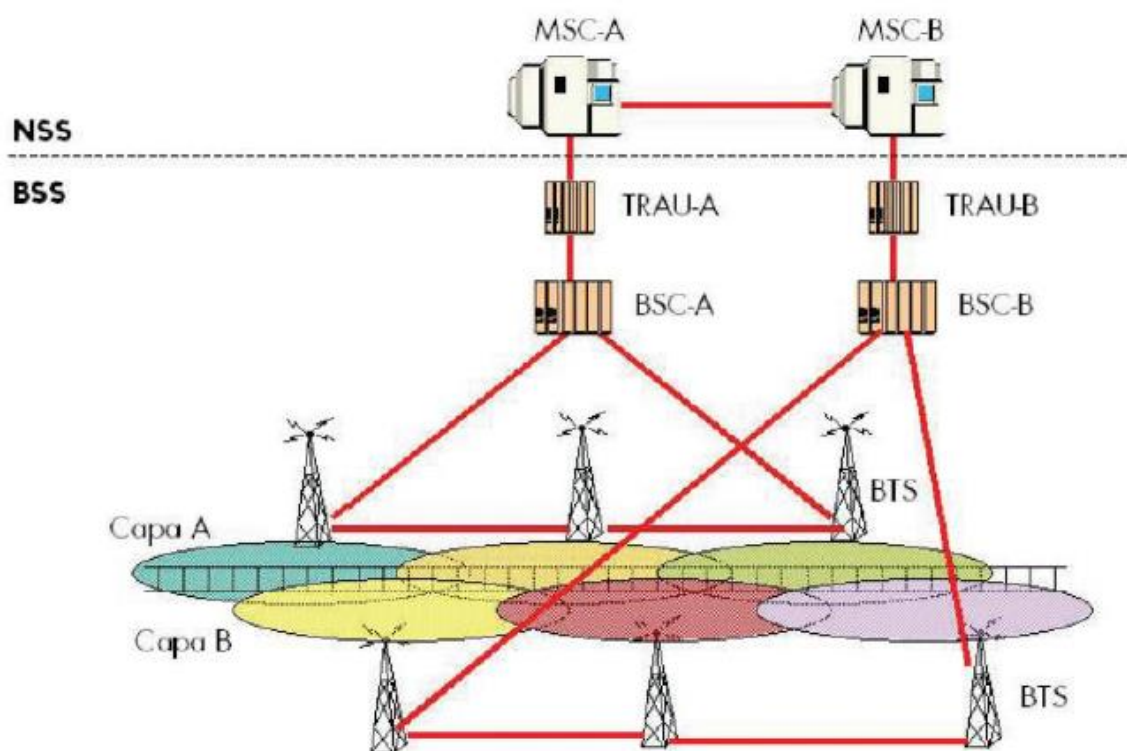


Figura 9. Esquema de redundancia de una red GSM-R.

El número de transceptores disponibles en cada estación base se calcula para poder cursar el tráfico generado en la línea en el caso de fallo completo de una de las dos capas. Para ello, las estaciones base a lo largo del trayecto se encuentran equipadas con un número de transceptores activos por celda, resultantes del correspondiente cálculo de tráfico, y con un transceptor de reserva en *stand by*. En caso de que falle uno de los transceptores

activos de una estación base, se deberá activar automáticamente el transceptor de reserva. Esta configuración de la estación base se denomina n+1.

1.6.4 Cobertura radioeléctrica

Para hacer compatible estas redes GSM-R con el estándar europeo EIRENE (*European Integrated Railway Radio Enhanced Network*) proyectado por la UIC se deben de cumplir una serie de requisitos de niveles de cobertura radioeléctrica. Este nivel de cobertura se define como la potencia medida en el puerto de una antena isotrópica de ganancia 0 dBi situada a 4 m por encima de la vía. Para la planificación radioeléctrica se establecen unos límites inferiores de cobertura establecidos en los siguientes valores mínimos:

- En campo abierto: -85 dBm
- En interior de túnel: -70 dBm

En ambos casos los niveles de cobertura son más restrictivos que los exigidos por EIRENE.

En la planificación radioeléctrica se tiene en cuenta la necesidad de una zona de solapamiento entre celdas suficiente para llevar a cabo el traspaso de llamada o *handover* [10]. El tiempo total para realizar un *handover*, incluyendo el periodo en el que el móvil se encuentra realizando y promediando medidas, es inferior a 6 s, dependiendo de las circunstancias particulares de cada *handover*. Por lo tanto, considerando este tiempo para realizar un *handover*, para velocidades máximas de 350 km/h la zona de solapamiento será de 600 m aproximadamente. De esta forma, se determina la configuración del sistema radiante con sectores combinados por medio de un divisor de potencia que se conecta a los mismos transceptores dentro de la estación base, para de esta forma minimizar el número de *handovers* a realizar a lo largo del trayecto.

El área de cobertura radioeléctrica comprende, además del trazado de la línea, un área de 300 m alrededor de instalaciones fijas, como apartaderos y edificios técnicos, bases de mantenimiento, caminos de servicio, etc.

1.6.5 Limitaciones del sistema

Timing advance:

El sistema GSM se basa en la utilización de una estructura de acceso múltiple por división en el tiempo (*Time Domain Multiple Access*, TDMA) con una estricta sincronización temporal. En el enlace ascendente los terminales más alejados de la estación base deben adelantar su instante de transmisión para compensar el doble retardo asociado a la recepción tardía del canal SCH descendente y a la mayor distancia de propagación en sentido ascendente. Esto se consigue mediante un mecanismo de ajuste denominado avance temporal o *timing advance*, que permite compensar los retardos de ida y vuelta. En consecuencia, el retardo de propagación más el retardo introducido por el proceso de repetición no puede exceder este valor, teniendo en cuenta ambos sentidos de transmisión. Esta restricción debe tenerse en cuenta en el diseño de una configuración basada en repetidores.

El retardo máximo permitido de las señales entre una estación base y una estación móvil es de 116,5 μs , que se corresponde con una distancia máxima de 35 km vía radio y 20 km vía fibra óptica. En el caso que nos ocupa, las distancias consideradas máximas entre estaciones bases o entre estaciones bases y repetidores son bastante menores, y, por lo tanto, se puede asumir que el máximo avance temporal permitido no será sobrepasado en ninguno de los emplazamientos.

Dispersión temporal:

Según las especificaciones GSM, los receptores deben ser capaces de funcionar adecuadamente con los niveles de recepción mínimos especificados en canales con una dispersión temporal de hasta 16 μs . Si bien la propagación en túneles da lugar a retardos muy inferiores a este valor, esta limitación debe tenerse en cuenta en el caso de cobertura mediante repetidor, pues éste actúa como un dispersor artificial de la señal existente en el exterior. Debido al retardo introducido por el procesado y la amplificación de la señal, es posible que en alguna zona del interior o del exterior del túnel estén presentes la señal de la estación base y la procedente del repetidor con niveles parecidos y retardos relativos de varios μs . El diseño de la configuración específica debe asegurar que las señales con

retardo superior a $16 \mu\text{s}$, relativo a la más potente, se reciban con una atenuación suficiente para no introducir una degradación apreciable en el receptor. Esta atenuación mínima necesaria se puede cifrar en 9 dB, que es la relación de protección co-canal en GSM.

1.7 Niveles ETCS

El sistema de control ferroviario europeo ETCS es un sistema de señalización y control ferroviario utilizado en la Unión Europea y forma parte del sistema europeo de gestión del tráfico ferroviario ERTMS [3].

El objetivo del sistema es detener al tren si el agente de conducción no respeta las señales de la línea o las velocidades máximas del tramo, evitando la posibilidad de un accidente por fallo humano. En el caso de la alta velocidad, las cabinas incorporan también un sistema de representación del estado de la señalización, como el que se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Cabina *Thalys* PBKA. Esquema obtenido de [3].

El funcionamiento se basa en que el tren se comunique con la vía recibiendo información del estado de las señales y las limitaciones de velocidad que el tren tiene por delante. El

sistema genera autorizaciones de movimiento. Existen varios métodos de comunicación entre la señalización, cada uno de los cuales tiene una complejidad y resultados diferentes. El sistema ECTS está organizado en 4 niveles, que se explican en los siguientes apartados.

Nivel 0 + ASFA (En España)

Se trata básicamente de un funcionamiento sin ERTMS. Está contemplado para ser utilizado en situaciones poco corrientes, como una avería o la circulación esporádica en una línea que no disponga del sistema, quedando la comprobación de las señales bajo criterio del maquinista. Un esquema del nivel 0 + ASFA se muestra en la Figura 11.

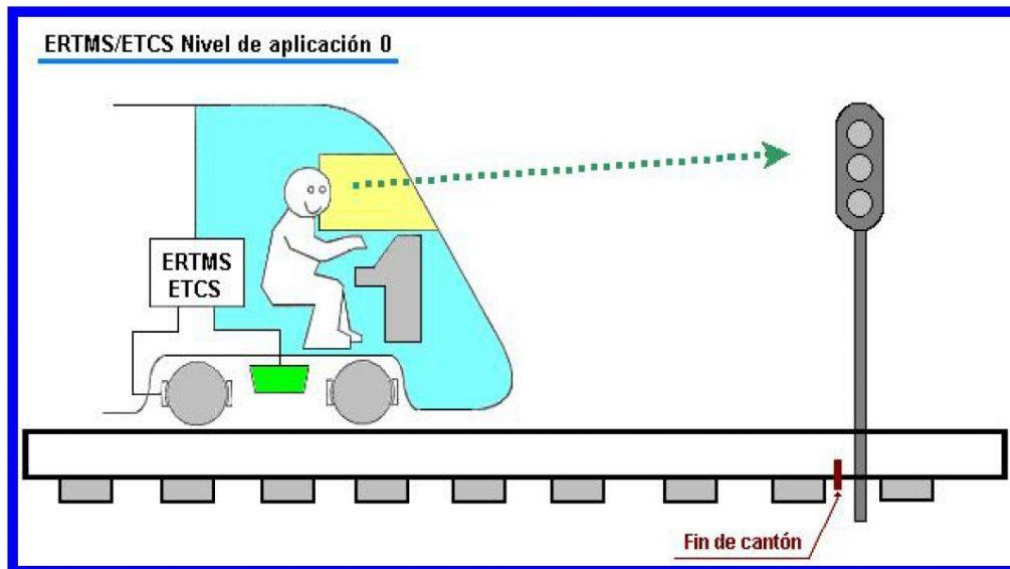


Figura 11. Nivel ETCS 0. Imagen obtenida de [3].

Nivel 1 de ECTS

Se recibe información puntual mediante eurobalizas y eurolazos. Necesita señalización lateral, por lo que la implementación de este nivel es cara. El esquema del nivel 1 de ECTS se muestra en la Figura 12.

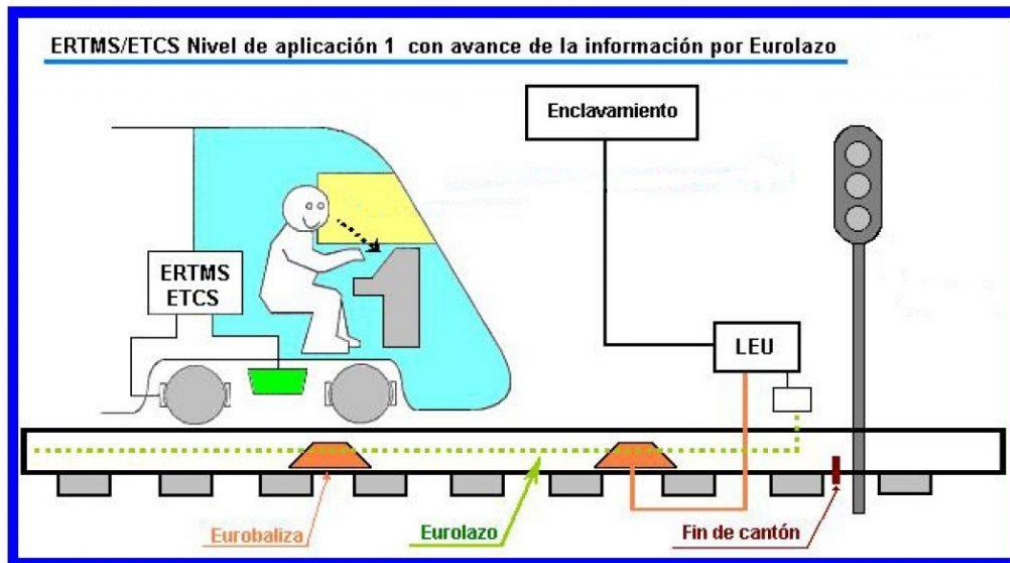


Figura 12. Nivel ETCS 1. Imagen obtenida de [3].

Nivel 2 de ECTS

La información se recibe continuamente mediante GSM-R y existe por tanto una supervisión continua. La línea está regulada por el RBC y no se necesita señalización lateral, por lo que la implementación es más asequible que el nivel 1. En este sentido, el despliegue de ERTMS en España se hace directamente sobre nivel 2. El esquema del nivel 2 del sistema ECTS se muestra en la Figura 13.

Nivel 3 de ECTS

Este nivel no está basado en circuitos de vía ni en eurobalizas de relocalización, sino en la situación de cada tren generada por él mismo gracias a sistemas de navegación por satélite, como GPS o Galileo [11], o GSM-R. De esta forma, cada tren crea su propio cantón móvil (espacio seguro hasta el tren anterior, dónde no puede haber más de un tren). Las eurobalizas solo actúan como radiofaros, señalando su posición. El esquema del nivel 3 de ECTS se muestra en la Figura 14.

Este nivel habilita, en teoría, para la conducción autónoma en trenes de alta velocidad. No obstante, su implementación actual es reducida y solo en ámbitos de pruebas del sistema.

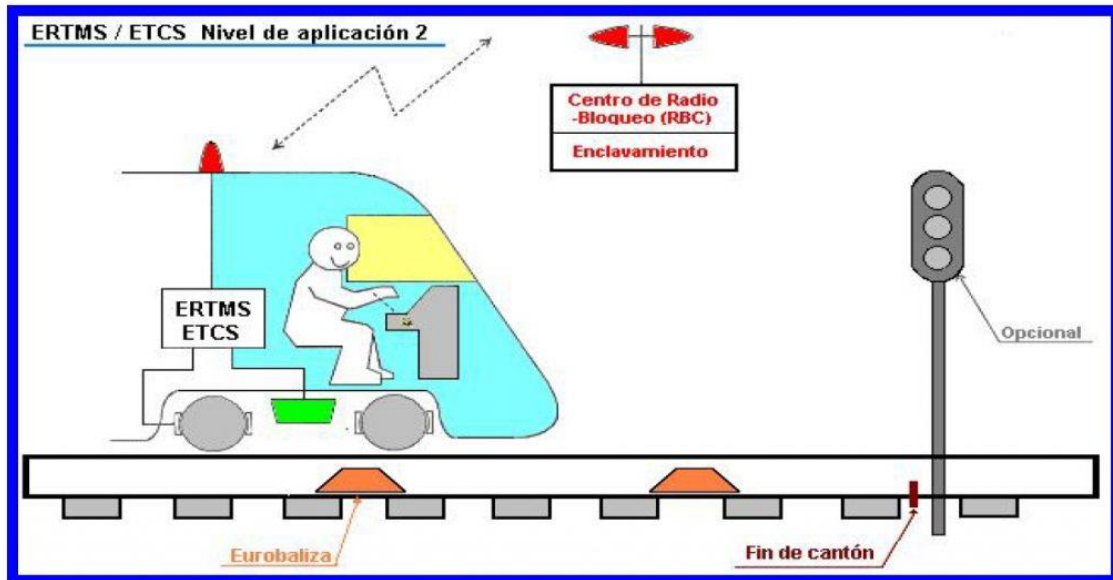


Figura 13. Nivel ETCS 2. Imagen obtenida de [3].

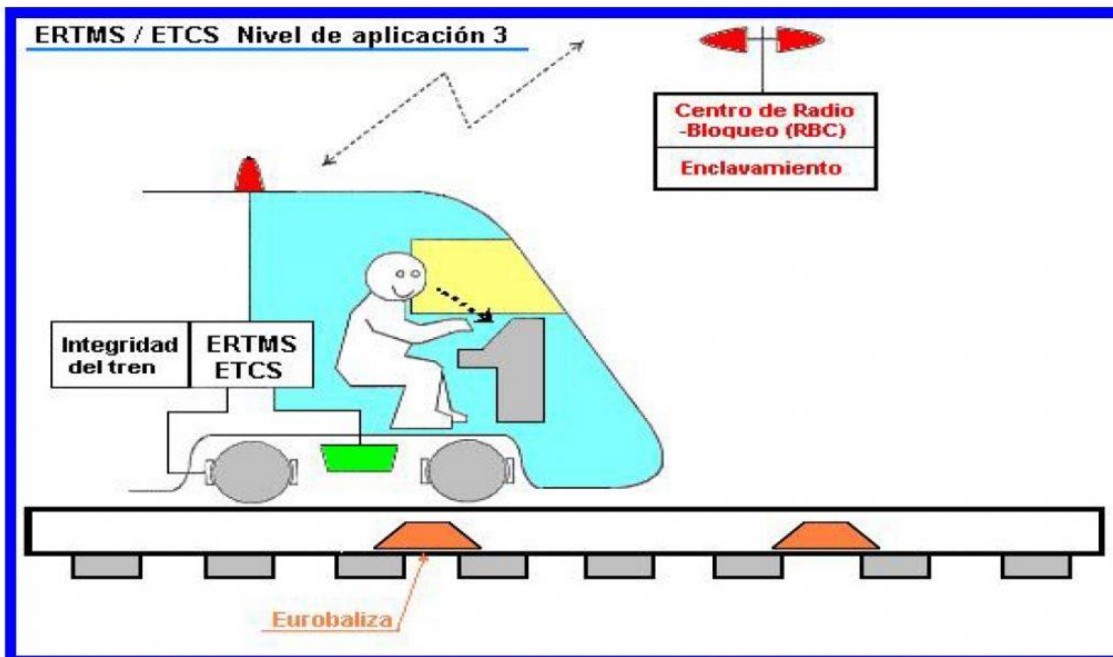


Figura 14. Nivel ETCS 3. Imagen obtenida de [3].

Las características de los diferentes niveles ETCS se resume en la Tabla 1. A medida que aumenta el nivel utilizado, la infraestructura se abarata, ya que se utilizan sistemas de radiofrecuencia, en vez de utilizar numerosas señales y balizas. Además, se aumenta el rendimiento de las infraestructuras ferroviarias, ya que aumenta la velocidad máxima y la densidad de trenes en un mismo tramo.

| | ETCS 1 | ETCS 2 | ETCS 3 |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| Señales laterales | SI | Opcional | NO |
| Circuitos de vía | SI | SI | NO |
| Eurobalizas | SI (muchas) | SI (unas cuantas) | SI (pocas) |
| GSM-R | Opcional | SI | SI |
| GPS/Galileo | NO | NO | SI |
| Velocidad | 300 km/h | 350 km/h | 500 km/h |
| Frecuencia de trenes | 5 minutos y medio a 300 | 2 minutos y medio a 350 | Muy alta |

Tabla 1. Resumen de los diferentes niveles ETCS [3].

1.8 Contexto del presente TFM

La implementación en campo de un proyecto de estas características implica tener que tomar decisiones que no estaban contempladas a priori, y adaptarse a las circunstancias y condiciones sobrevenidas.

El control y vigilancia de las obras debe incluir todas las actuaciones necesarias para asegurar la correcta realización de las obras de ejecución del proyecto, así como el cumplimiento de las condiciones impuestas en la documentación contractual del contrato de obras y en el resto de normativa aplicable descrita en el pliego de prescripciones técnicas.

Para la correcta realización de los trabajos de control y vigilancia de las obras, es necesario conocer en profundidad toda la documentación recogida en el proyecto (memoria y anejos, pliegos, planos y presupuesto), el Estudio y Plan de seguridad y salud,

el Programa de actuaciones medioambientales, y el Plan de Aseguramiento de la Calidad del adjudicatario de las obras.

El esquema del presente TFM está basado en los trabajos y actividades principales que se han de llevar a cabo dentro de las tareas de control y vigilancia de las obras. Dichas tareas se pueden clasificar en:

- Trabajos anteriores a la ejecución de las obras.
- Trabajos durante la ejecución de las obras.
- Trabajos durante las pruebas, validaciones y puestas en servicio.
- Trabajos documentales anteriores y posteriores a la recepción de las obras y entrega de las instalaciones ejecutadas y contempladas en este proyecto.
- Seguimiento presupuestario y programación.

1.9 Objetivos del presente TFM

El principal objetivo de este TFM es exponer un ejemplo práctico de proyecto de despliegue y puesta en servicio de un sistema GSM-R para una línea ferroviaria de alta velocidad en un entorno complejo desde el punto de vista de propagación radioeléctrica.

Se tratará de explicar con detalle cada uno de los pasos a seguir teniendo en cuenta las diferentes fases de ejecución del proyecto, desde los primeros replanteos hasta el control de calidad y pruebas previas a la puesta en servicio.

Por una parte, se tienen los retos inherentes a las comunicaciones en entornos de movilidad (dispersión *Doppler* o frecuencial) y, por otra parte, multicamino y propagación en medios guiados (túneles). Se considerarán modelos de propagación radioeléctrica y la adecuada caracterización de las antenas y elementos radiantes empleados en el proyecto.

Además, se añade una aplicación diseñada para la geolocalización de las fotografías realizadas para el seguimiento de las obras y un estudio detallado de las medidas realizadas durante las fases previas a la puesta en servicio de una red GSM-R.

2 Fase de diseño y planificación del proyecto de comunicaciones GSM-R

2.1 Estudio de la solución propuesta

La primera fase de un trabajo de implementación de un sistema de comunicaciones consiste en un estudio detallado de la solución propuesta por los proyectistas, donde se analizan los distintos subsistemas. En el caso concreto de los proyectos de GSM-R, estos dependen principalmente de los siguientes subsistemas (véase Figura 15):

- Subsistema de alimentación.
- Subsistema de red de datos.
- Subsistema de obra civil.
- Subsistema de RF.

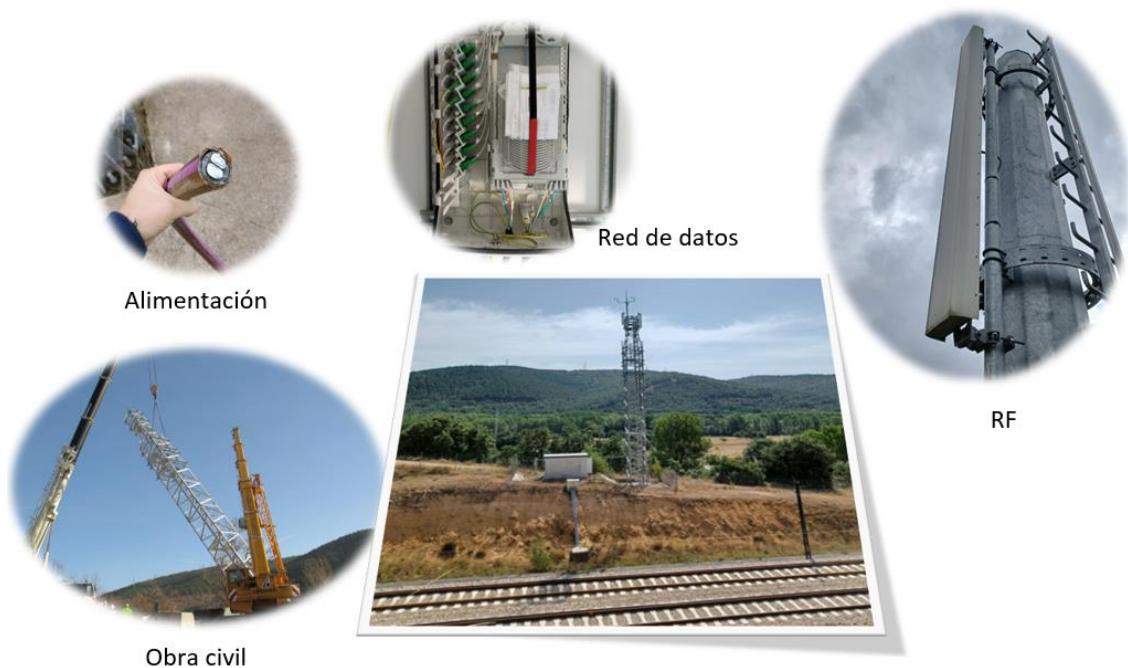


Figura 15. Diagrama de los diferentes subsistemas del sistema GSM-R.

2.1.1 Subsistema de obra civil

Este subsistema consiste en la construcción y habilitación de acceso de los emplazamientos teniendo en cuenta las necesidades de cobertura, pues no es lo mismo dar servicio en un túnel o en el exterior. En este último caso probablemente haya que construir algún tipo de soporte para las antenas, como mástiles o torres.

El estudio previo de los emplazamientos pasa por comprobar que la titularidad patrimonial pertenece al promotor, en este caso Adif. En el caso de que el proyecto sea de alta velocidad, es más o menos sencillo encontrar espacio dentro de los límites de la traza, ya que la plataforma de alta velocidad (la estructura para colocar la vía y sus alrededores) es más amplia, y al tratarse de proyectos con más inversión económica es más fácil que la zona esté ya expropiada.

En el caso de los proyectos que adaptan una línea de ferrocarril convencional para integrar ERTMS con GSM-R es más complicado, ya que el terreno perteneciente a Adif se encuentra en el ámbito más cercano a las vías. Además, al tratarse de líneas en funcionamiento desde hace muchos años, el urbanismo de las zonas afectadas está ya adaptado al tráfico ferroviario existente, por lo que hay menos espacio. En consecuencia, los emplazamientos en este tipo de proyectos sobre líneas en explotación están mucho más condicionados que en nuevas líneas, dónde se suelen realizar expropiaciones suficientes, por lo que los replanteos se hacen incluso más importantes.

2.1.2 Subsistema de alimentación

La manera de alimentar los emplazamientos de GSM-R varían de la misma manera que varía la alimentación general de cada línea ferroviaria. De la misma forma que hay una técnica dentro de Adif que se encarga de las telecomunicaciones, existe otra que se encarga de la energía. Dependiendo del tipo de trazado y de si es alta velocidad o convencional, la energía se transporta de maneras diferentes.

Normalmente se intenta que las telecomunicaciones y la catenaria se alimenten de fuentes diferentes, para tener más robustez en caso de que algo ocurra con un tipo de

alimentación. De esta forma, las estaciones base de telefonía móvil (*Base Transceiver Station*, BTS) suelen tener acometida de la línea de catenaria y también de algún tipo de tendido por canaleta. Además, se busca que los transformadores implicados sean independientes físicamente. Otras veces, si existe la posibilidad se puede realizar una acometida desde una empresa comercializadora externa, como puede ser el caso de un emplazamiento en un núcleo urbano.

Para la alimentación de los emplazamientos de las cabezas remotas, existen tres posibilidades principalmente:

- Equipo transformador propio: Se da principalmente en el caso de que sea una cabeza remota que cubra bastante terreno, normalmente en exteriores y con las antenas colocadas en mástiles o incluso torres.
- Alimentado desde una BTS: Se realiza un tendido eléctrico específicamente para alimentar los rectificadores de las cabezas remotas desde la BTS de cada capa. Esta opción es interesante, ya que se alimentan desde los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAIs) de las casetas de las BTS, pero tienen el inconveniente de tener que hacer tendidos eléctricos, normalmente caros, de varios kilómetros.
- Alimentado por otra técnica: Este tipo de alimentación suele darse en lugares especiales, como en las galerías de los túneles más grandes. Las cabezas remotas y todo el equipo asociado tienen un consumo moderado, por lo que hay veces que es más interesante y económico recibir suministro eléctrico por parte de otra técnica con consumos y tendidos más importantes.

Uno de los problemas que se detectaron en este subsistema fue que, al realizar el cambio en los elementos radiantes en el proyecto modificado de la Variante de Pajares, algunos emplazamientos, que ya contaban con alimentación, cambiaron de posición, pasando a quedar sin la alimentación redundante necesaria. Estos nuevos equipos que se van a instalar en estas galerías tienen un consumo mayor que los repetidores de fibra óptica contemplados en un principio, lo que puede afectar a las caídas de tensión en los tendidos. En este sentido hubo que realizar un estudio para la realización de nuevos tendidos de

cables para cumplir la independencia de alimentación necesaria entre capas, teniendo en cuenta también que se cumpliera una caída de tensión menor al 5%.

2.1.3 Subsistema de cobertura radioeléctrica

Este subsistema describe la planificación de la red radio. El diseño incluye dos redes radio independientes para cumplir los requisitos de redundancia, obteniendo de esta forma un sistema de BTS diferenciadas por capa.

Dentro del radio máximo de una celda, se consiguen siempre los niveles de potencia requeridos cuando se tiene línea de vista entre las antenas empleadas para las radiocomunicaciones. Sin embargo, cuando aparecen obstrucciones a la propagación radioeléctrica tales como edificaciones, elevaciones del terreno o masa forestal, es necesario realizar predicciones con una herramienta de cálculo de propagación radioeléctrica y con modelos digitales de representación del entorno de propagación. Para estos cálculos, se han empleado modelos digitales de elevaciones LIDAR del último Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con precisión altimétrica $<0,3\text{m}$ y resolución espacial de 3m, del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), que fueron comprobados y corregidos a la vista de obstáculos a la propagación radioeléctrica que aparecen en el ciclo de vida de la instalación.

Se ha utilizado el método de predicción de Okumura-Hata por ser específicamente destinado a aplicaciones de comunicaciones móviles GSM. Para detectar zonas en las que la predicción no alcanza el suficiente detalle, se utilizó la recomendación UIT-R P.529-3 como comprobación adicional a los cálculos basados en el método de Okumura-Hata, incluyendo siempre los efectos de la difracción.

La banda de frecuencias de cálculo es la del GSM-R, comprendida entre los 876-880 MHz y 921-925MHz.

Se ha adoptado una solución de estaciones base con cabezas remotas de radio (*Remote RadioHead*, RRH) distribuidas a lo largo de la línea, e interconectadas por medio de fibras ópticas.

Se ha minimizado el número de trasposos de llamada y re-selecciones de celda a lo largo de la línea utilizando, de forma general, la celda compuesta en los sistemas radiantes y las cabezas remotas en modo repetidor. Tanto en las estaciones base nodales como en las remotas, se han ubicado las antenas orientadas en cada sentido de la vía, combinadas por medio de divisores simétricos o asimétricos.

El número de transceptores disponibles en cada estación base ha sido calculado para poder cursar el tráfico generado en la línea en el caso de fallo completo de una de las dos capas. Para ello, las estaciones base a lo largo del trayecto se encuentran equipadas con un número de transceptores activos por celda, resultantes del correspondiente cálculo de tráfico, y con un transceptor de reserva en *standby*. En caso de que falle uno de los transceptores activos de una estación base, se deberá activar automáticamente el transceptor de reserva. Esta configuración de la estación base se denomina $n+1$.

En el caso de que una estación base de una capa deje de funcionar por completo, la llamada en curso de un usuario deberá ser mantenida gracias a las BTS contiguas de la capa contraria. Para ello, es necesario tener correctamente definida la lista de celdas vecinas de aquella que ha dejado de funcionar y que los transceptores de reserva de las BTS adyacentes de la capa contraria se activen automáticamente, pasando a estar todos activos. De esta forma, se consigue mantener el número de transceptores activos en la zona afectada por el fallo de una estación base.

En funcionamiento normal del sistema, cada una de las capas gestiona los trenes que circulan en un determinado sentido.

El diseño de cada una de las capas de la red radio se ha realizado de forma que la causa de traspaso de llamada o *handover* sea la de mejor servidora [10]. Es decir, el móvil cambia de celda en el momento que el nivel recibido de una celda vecina es mayor al de la servidora en la cantidad definida en la base de datos del sistema. Sólo en casos excepcionales se inicia un *handover* obligatorio. Estos casos se corresponden con fallos en estaciones base de la capa o en la totalidad de esta.

Este traspaso de llamada será del tipo *hard-handover*, donde el terminal móvil se desconecta de la estación base que le esté dando servicio y durante un tiempo, del orden

de milisegundos, no está conectada a ninguna estación base, hasta conectarse con la nueva [10]. Este método se utiliza tanto en GSM como en GSM-R para minimizar las interferencias de canal al utilizar diferentes rangos de frecuencias entre canales adyacentes.

2.1.4 Subsistema de red de datos

El funcionamiento de los diferentes emplazamientos se basa en la interconexión de los dispositivos instalados. De esta forma, las cabezas remotas están conectadas con los módulos de sistema de las BTS de las que dependen mediante fibra óptica, mientras que las propias BTS se interconectan entre sí y con el BSC utilizando una línea de capacidad E1 [12] y funcionando mediante jerarquía digital síncrona (SDH). En la actualidad, existen algunos proyectos para realizar esta conectividad de SDH mediante emulación de paquetes *Abyss* sobre el protocolo IP, que supone una mejor integración en otras redes de comunicaciones. De todos modos, en los proyectos en los que estoy involucrado, se ha optado por la solución tradicional de SDH. Todos los tendidos de fibra óptica, así como los equipos de SDH los instala la técnica de Telecomunicaciones Fijas, con diferentes topologías para interconectar los equipos de las BTS y también las cabezas remotas.

2.1.5 Subsistema de elementos radiantes

Este subsistema se compone de los diferentes elementos radiantes, así como las guías-ondas desde los equipos hasta las antenas. Estas antenas varían dependiendo la localización de su emplazamiento.

En espacios abiertos se suelen utilizar antenas de panel similares a las empleadas en otras redes de telefonía móvil. En concreto, se suelen utilizar antenas sectoriales bastante directivas, de 17 dBi o 21 dBi, que proporcionan cobertura en el plano horizontal a sectores de 65° o 30° respectivamente, dependiendo del trazado de las vías. Estas antenas se suelen colocar en mástiles o torres, y en ocasiones en la boca de los túneles, para dar cobertura en la zona exterior de estos.

La solución en los túneles suele ser la colocación de antenas logoperiódicas en polarización vertical para la cobertura en los tubos principales y suelen tener una ganancia de unos 12 dBi.

Otra solución para el diseño de cobertura dentro de los túneles es la utilización de cable radiante, que permite dotar de cobertura a las galerías también, y de esta forma poder dar servicio adicionalmente a los servicios de emergencia. Esta solución se adopta en los túneles de Pajares y Pontones, los más largos de la Variante de Pajares.

Para los sistemas radiantes, se emplean latiguillos súper flexibles, kits de tierra y descargadores de protección contra el rayo, todos ellos adecuados a la banda de GSM-R.

2.2 Replanteos y adecuación del proyecto

2.2.1 Sistema de alimentación – Redundancia y cálculo secciones para caídas de tensión

La energía que se suministra a cada capa en el túnel de Pajares procede de centros de transformación diferentes, situados dentro del propio túnel, mediante tendidos de la técnica de Telecomunicaciones Fijas, que también proporciona el servicio de fibra óptica necesario. De esta manera, los centros de transformación impares alimentan a una capa y los pares a la otra. Al haber cambiado de lugar los emplazamientos, algunos quedaron en galerías alimentadas por el centro de transformación adecuado, pero otras no. Además, la técnica de Protección Civil y Seguridad también tiene tendidos en estas galerías, pero el origen de esta energía es siempre del centro de transformación más cercano.

Teniendo todo esto en cuenta, se ha buscado una solución óptima, priorizando que se cumpla la independencia de alimentación entre capas se repartieron los emplazamientos entre las técnicas de Protección Civil y Telecomunicaciones Fijas, realizando tendidos auxiliares entre algunas galerías. Para el cálculo de las caídas de tensión se han tenido en cuenta los consumos máximos de todos los consumidores de cada cable, la sección y composición de éste, y de si se trataba de un tendido monofásico o trifásico mediante las siguientes ecuaciones (2.1), (2.2):

$$CdT \text{ monofásica } [V] = \frac{2 \cdot L \cdot P}{k \cdot S \cdot U} \quad (2.1)$$

$$CdT \text{ trifásica } [V] = \frac{L \cdot P}{k \cdot S \cdot U} \quad (2.2)$$

En estas ecuaciones (2.1) y (2.2), L representa la longitud del tendido, P es la potencia máxima demandada, k es un coeficiente del material (56 para aluminio), S es la sección del conductor, y U es la tensión inicial.

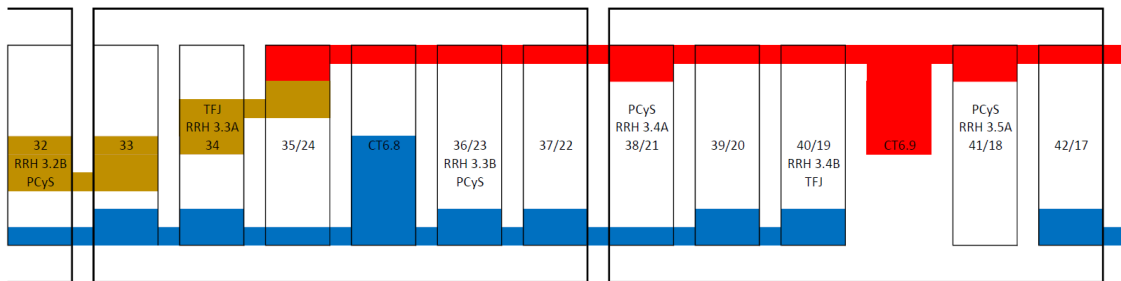


Figura 16. Solución al problema de independencia de alimentación.

En la Figura 16 se muestra la solución en algunas galerías. En rojo, se muestra el tendido eléctrico por la vía oeste, en azul por vía este por parte de Telecomunicaciones Fijas, los cuadros finos representan una galería, los cuadros gruesos las galerías que alimenta Protección Civil para cada centro de transformación, y en color marrón los tendidos auxiliares que se han tenido que realizar.

Esta solución se ha aplicado en los túneles de Pajares y Pontones, para un total de 48 cabezas remotas situadas en las galerías transversales de evacuación, y también en los túneles de acceso de Buiza y Folledo. Para alimentar todos estos emplazamientos se utilizan 18 centros de transformación, con tendidos eléctricos de diferentes consumos y secciones, monofásicos y trifásicos, involucrando varias técnicas, por lo que la coordinación en este tipo de tendidos es muy importante.

2.2.2 Sistema de radiofrecuencia – Medidas de radiofrecuencia (RF)

Pese a que en el estudio preliminar del proyecto no se detectaron problemas en este subsistema, la empresa contratista comunicó que la cobertura ofrecida podría ser insuficiente, alegando que tal vez fuese necesario elevar la altura proyectada de los emplazamientos acudiendo a torres o mástiles de más altura.

Desde la asistencia técnica se procedió a un estudio en profundidad del problema mediante cálculos analíticos, simulaciones y una campaña de medidas *in situ* (Figura 17) en colaboración con la empresa contratista, supervisando y garantizando que esta campaña de medidas se realizase correctamente.

La metodología de los cálculos analíticos fue la siguiente: para empezar, se consiguió los datos de la altura de uno de los tramos de interés (véase Figura 18). Esta información se consiguió utilizando las bases de datos del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, en la página del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), más concretamente a través del Centro de Descarga del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), en ficheros digitales de 2x2 km de extensión.

Utilizando un programa GIS, se obtiene el perfil de elevación del terreno (Figura 18), donde se comprobó que la línea de visión directa está comprometida por una zona arbolada, que va a afectar negativamente a la potencia recibida debido a fenómenos de dispersión.



Figura 17. Fotografía de una de las campañas de medida de cobertura, con la antena situada a 35 metros.

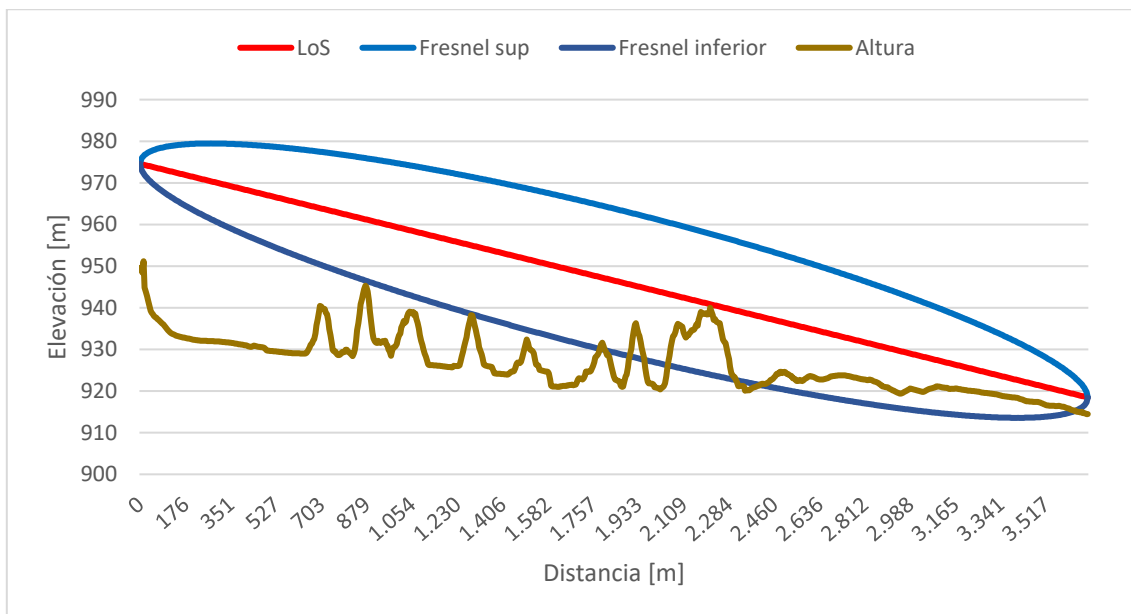


Figura 18. Perfil de elevación del terreno en el tramo de interés, junto a la línea de visión directa y el elipsoide de Fresnel.

El tramo en concreto preocupaba por el solape producido, que según la normativa tiene que ser de al menos 600 metros, y los niveles de cobertura deben estar por encima de -95 dBm para cumplir los criterios del *European Integrated Railway Radio Enhanced Network* (EIRENE) y por encima de -85 dBm para cumplir los criterios de ADIF. En este tramo se había realizado ya una campaña previa de medidas desde el norte, por lo que estaba bien caracterizado ya, y se disponía de un mapa de niveles de cobertura, que se puede ver en la Figura 19.

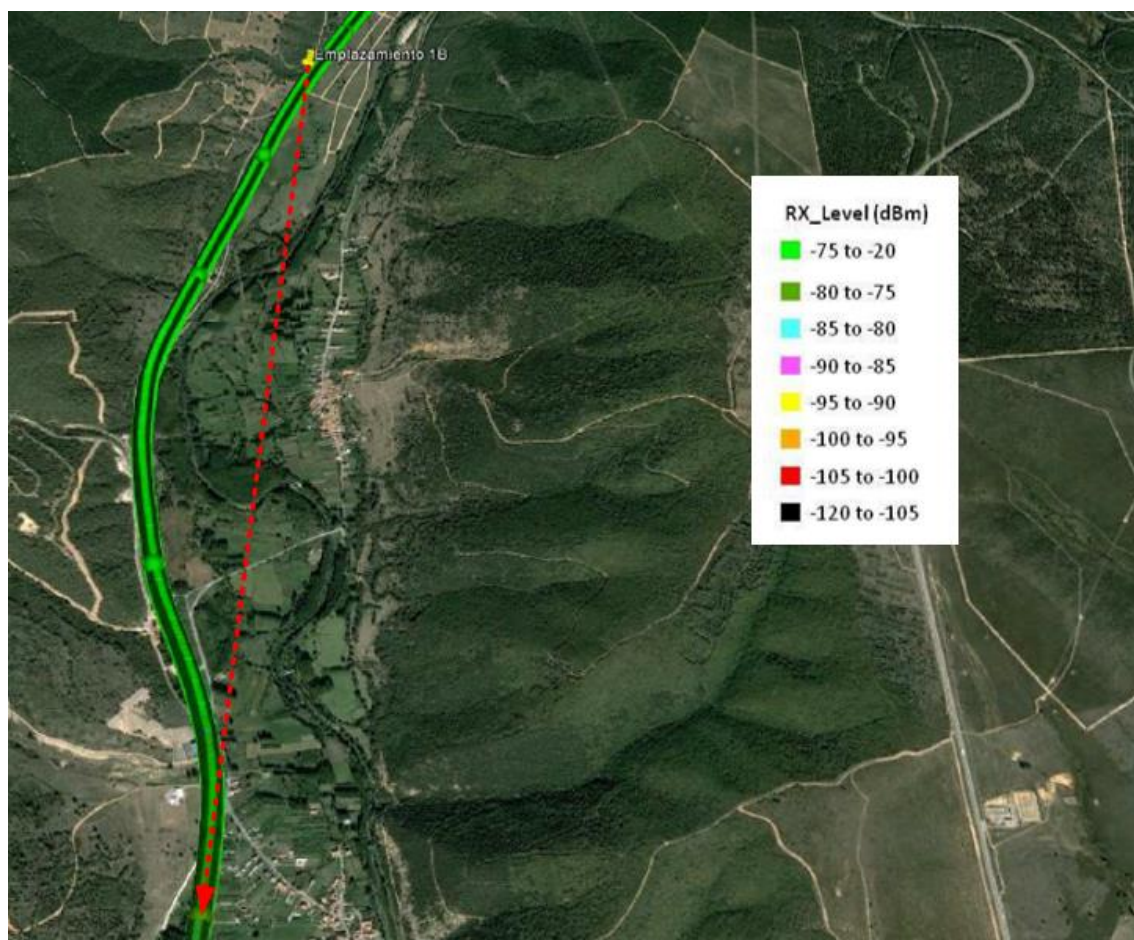


Figura 19. Medidas previas del solape desde el norte.

Para realizar el modelado teórico se tiene en cuenta la PIRE de la antena de la BTS y del equipo receptor ubicado en el tren. En cuanto al receptor del tren, se tiene en cuenta una

antena isotrópica de 0 dB de ganancia situada a cuatro metros sobre el nivel del suelo. Para la antena de la BTS, la PIRE se puede calcular según se indica en la Tabla 2.

Para el cálculo de las pérdidas de propagación se va a utilizar el modelo de Okumura-Hata, cuyo uso es recomendado en los anexos del proyecto. Este modelo, que es uno de los más utilizados para calcular la cobertura esperada en una localización, fue desarrollado en base a una campaña de medidas, para un rango de frecuencias entre 150 a 1.920 MHz, una altura de la estación base de 20 a 1.000 metros, de la altura móvil entre 1 a 10 metros y una distancia entre transmisor y receptor entre 1 a 100 kilómetros. Además, distingue tres tipos de áreas contempladas:

- Área urbana: Corresponde a zonas con altas edificaciones de gran densidad de población.
- Área suburbana: Zonas con ciudades pequeñas, carreteras o casas dispersas, dónde existen obstáculos cerca del usuario, como por ejemplo árboles o pequeñas colinas, con poca congestión.
- Área rural: Espacios abiertos sin grandes obstáculos cerca del usuario.

| | |
|--|--------------------|
| (1) Potencia de salida del equipo de radio | 47,80 [dBm] |
| (2) Pérdidas <i>splitter</i> | 3 [dB] |
| (3) Pérdidas <i>feeder</i> (3,67 dB/100m) | 1,25 [dB] |
| (4) Pérdidas en transiciones y latiguillos | 3 [dB] |
| (5) Ganancia antena x30 | 20,80 [dBi] |
| PIRE = (1) – (2) – (3) – (4) + (5) | 61,35 [dBm] |

Tabla 2. Cálculo de la PIRE para la estación base.

El escenario estudiado en este TFM se considera como zona suburbana, teniendo en cuenta la ortofoto y el perfil de elevaciones. Para calcular las pérdidas debidas a la radiopropagación se utilizan las siguientes variables reflejadas en la Tabla 3.

El término de pérdidas de propagación (L_{50}) del modelo Okumura-Hata para el escenario estudiado vienen dadas por (2.3):

$$L_{50} = 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_{te}) - \alpha(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d) \quad (2.3)$$

Donde $\alpha(h_{re})$ viene definido por (2.4) para ciudades pequeñas o intermedias:

$$\alpha(h_{re}) = (1,1 \log(f_c) - 0,7) h_{re} - (1,56 \log(f_c) - 0,8) [dB] \quad (2.4)$$

Finalmente, para zona suburbana, las pérdidas de propagación totales son (2.5):

$$L(dB) = L_{50}(urbano) - 2 \left[\log \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5.4 [dB] \quad (2.5)$$

Las variables contempladas en el modelo de Okumura-Hata así como los valores considerados en el cálculo se indican en la Tabla 3.

| | | |
|------------------|-------|---|
| f | 925 | Frecuencia portadora [MHz] |
| h_{te} | 25 | Altura de la antena transmisora [m] |
| h_{re} | 4 | Altura de la antena receptora [m] |
| $\alpha(h_{re})$ | | Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil en función del área de servicio |
| d | 3,517 | Distancia [km] |

Tabla 3. Variables contempladas en el modelo Okumura-Hata.

Utilizando las anteriores expresiones (2.3)-(2.5) se obtienen unas pérdidas de propagación de 140,63 dB. De todos modos, como la antena transmisora está ubicada en una torre sobre un talud, la altura total de la antena transmisora se podría ajustar hasta a unos 50 metros, que supondría unas pérdidas de 135,39 dB.

Conocidas las pérdidas de propagación, la PIRE del transmisor, y la ganancia de la antena receptora, la potencia recibida (P_{rx}) se puede calcular como (2.6):

$$P_{rx} = PIRE_{tx} - L_{Okumura-Hata} + G_{rx} \quad (2.6)$$

Sustituyendo valores, se obtiene: $P_{rx} = 61,35 \text{ dBm} - 140,63 + 0 = -74,04 \text{ dBm}$

De esta manera, la potencia recibida sería de aproximadamente -74 dBm, que se ajusta a los intervalos reflejados en las medidas en campo representadas en la Figura 19.

Se ha podido realizar una comparación previa entre el modelo utilizado y unas medidas reales, de las que se comprueba que el modelo se ajusta bastante bien a las medidas previas realizadas, y que la cobertura ofrecida por el sistema GSM-R será acorde a la normativa.

2.2.3 Obra civil

Una vez que los emplazamientos del proyecto son ratificados mediante las medidas de RF y se certifica que en dichos emplazamientos la propiedad catastral es de Adif, se procede a ubicar físicamente el lugar donde se empezarán las excavaciones necesarias para las canalizaciones, las losas donde van ubicadas las casetas y el basamento para las torres.

Este trabajo de campo se realiza mediante replanteos, con representantes de las diferentes técnicas involucradas (energía, telecomunicaciones fijas, etc.), la asistencia técnica propia de GSM-R, la Dirección de obra, y la empresa contratista. Cada parte expone sus necesidades y su punto de vista y se llega a un consenso preliminar.

De cara a empezar las obras, se realizan estudios geotécnicos y geoelectrónicos en los lugares en los que se ha decidido construir, para validarlos. El estudio geotécnico estudia la composición del suelo y su dureza mediante prospecciones realizadas con máquinas como la de la Figura 20, y sirve para dimensionar las zapatas de la losa de la caseta y sobre todo del basamento de las torres.

Estos estudios tienen en cuenta también el tipo de suelo del emplazamiento mediante mapas de estratos y composición general del suelo como los de la Figura 21. Se puede esperar de este suelo que contenga limos, arenas y gravas, ya que se trata de una antigua

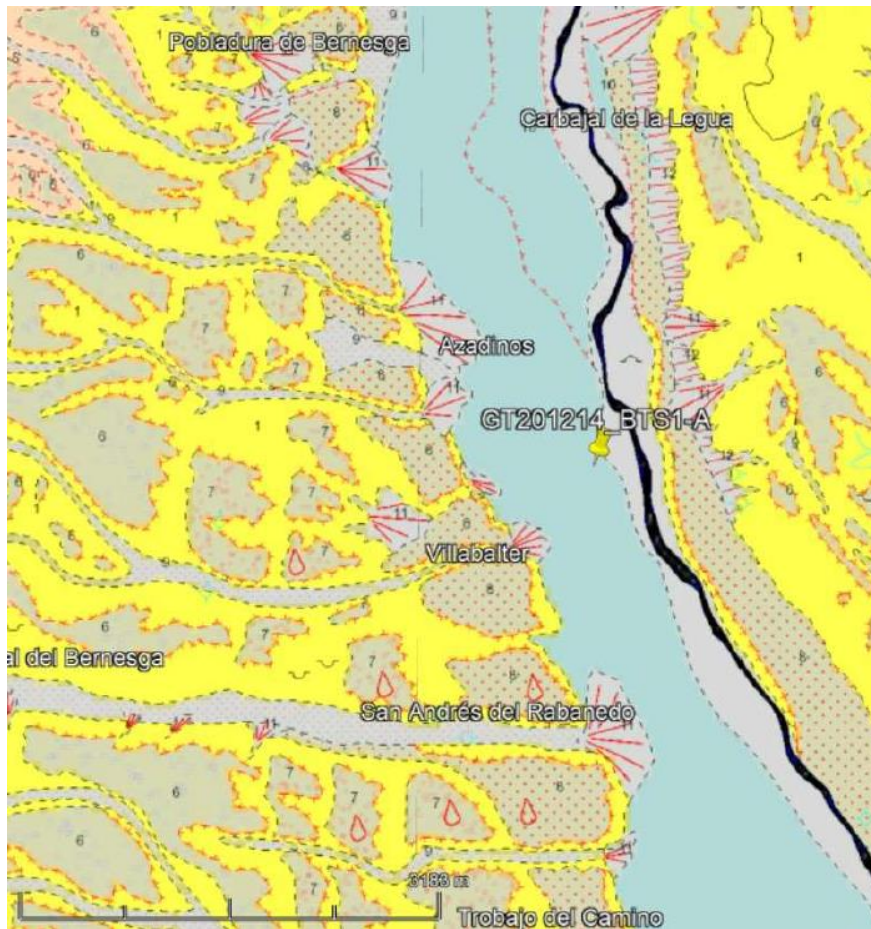
llanura de inundación del río Bernesga, en León. Además, también se estudia las características sísmicas de la zona.

Con la información recibida por parte de las prospecciones, y teniendo el tipo y composición del suelo, se elabora un informe que determina la viabilidad del emplazamiento y las características de las zapatas necesarias. Por ejemplo, con un suelo más duro, el tamaño de las zapatas será menor, y, por el contrario, con un suelo más blando se necesitará una zapata mayor para que posibles vientos laterales no consigan ladear la estructura de la torre.

Debido a que las torres de los emplazamientos pueden actuar como captadores del impacto de rayos, con el objeto de obtener un buen valor de tierras, todos los emplazamientos disponen de un sistema de tierras compuesto, en el caso general, por un anillo de tierras de la torre y un anillo de tierras para la caseta GSM-R. El estudio geoelectrico se realiza para hacer un cálculo más aproximado de la red de tierras del emplazamiento.



Figura 20. A la izquierda, máquina para realizar prospecciones geotécnicas. A la derecha, *setup* del estudio geoelectrico.



LEYENDA

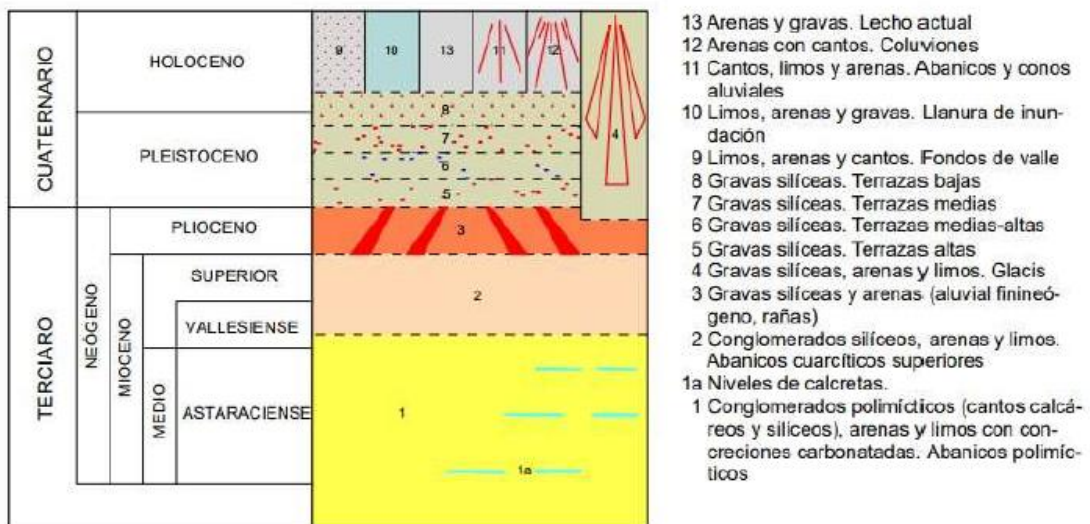


Figura 21. Composición del suelo de una zona de interés.

2.2.4 Herramienta para geolocalizar fotografías

El seguimiento de todo el proceso de estudio de la localización ideal se documenta mediante un reportaje fotográfico extenso para no tener que acudir numerosas veces a cada emplazamiento. Muchas veces se realizan replanteos para diferentes ubicaciones en el mismo día, por lo que es de interés tener una herramienta rápida para poder geolocalizar las fotos. En este sentido, diseñé y programé una aplicación JavaScript para ejecutar en un navegador de Internet que, utilizando los metadatos GPS de la fotografía, geolocaliza una imagen. Una captura de pantalla de dicha aplicación desarrollada se muestra en la Figura 22.

En la zona superior de la Figura 22 se encuentra un recuadro en el que arrastrar el archivo deseado. Una vez arrastrado, se carga la imagen en el navegador, así como un mapa de *Google Maps* y un enlace para copiar y compartir. De esta manera, se puede comprobar rápidamente en dónde se tomó una fotografía en concreto. La aplicación JavaScript proporciona además un mapa y un enlace que se pueden añadir fácilmente a cualquier informe.

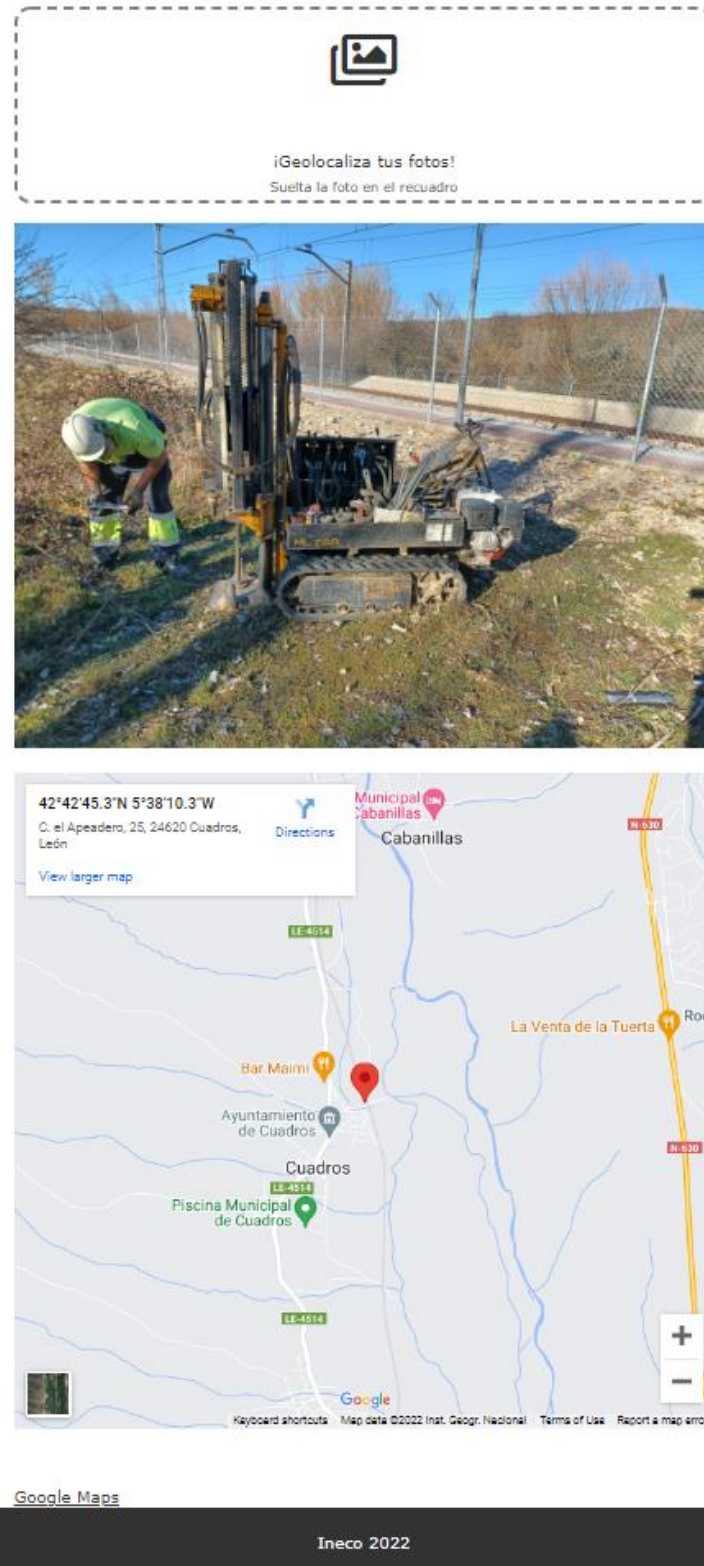


Figura 22. Aplicación JavaScript para geolocalizar fotografías.

3 Ejecución del proyecto de comunicaciones GSM-R

3.1 Controles de calidad y de los procesos de ejecución

3.1.1 Realización de pilotos

Para tener un control adecuado de la ejecución del proyecto, tanto a nivel de materiales como del resultado del trabajo en sí, es común realizar previamente unos pilotos o emplazamientos de ejemplo, donde se depuran todos los problemas posibles hasta que se da el visto bueno. En este momento se empezará a replicar este emplazamiento piloto en el resto de los sitios.

Esta metodología se utiliza para detectar los fallos de ejecución o si un material en concreto no cumple normativa en un momento muy temprano de la obra. Así se consigue que el coste relativo de tener que hacer una modificación sea bajo, al cambiar solo un emplazamiento y no tener que cambiarlo en un número mayor de emplazamientos.

Adicionalmente, para la realización de los pilotos se suele utilizar un documento adjunto del Plan de Aseguramiento de la Calidad, las Fichas de Inspección. Existe una ficha para cada emplazamiento tipo, y funciona como una pequeña guía, que contiene los problemas más recurrentes y los puntos en los que hay que prestar más atención en ese tipo de instalación para la comprobación de que todo está bien.

En el caso de los proyectos que se están tratando en el presente TFM, esta metodología es muy útil en la instalación de cabezas remotas en galería de túnel (donde hay más de 40 emplazamientos) y de las estaciones base.

En los días previos a la ejecución del piloto, la empresa contratista facilita la documentación de los elementos que va a instalar. En el caso del proyecto abordado en el presente TFM, algunos de estos elementos son los equipos de radio, los rectificadores, los diferentes cables, y las baterías.



Figura 23. Piloto de la instalación de cabeza remota en galería de evacuación.



Figura 24. Cable coaxial superflexible para la instalación en galerías de túneles.

Con el fin de ilustrar el procedimiento de control de calidad de estos elementos se presenta un ejemplo en la Figura 24, consistente en un cable coaxial superflexible. Este elemento se empleará también en la definición de la unidad de obra mostrada en el Capítulo 4 (en particular, en la Figura 53). En dicha definición de unidad de obra, se indica que debe cumplir con las especificaciones técnicas vigentes. En concreto, al instalarse en túneles de más de 1.000 metros, ha de cumplir las especificaciones indicadas en la ETI REGLAMENT (UE) N° 1303/2014 [16].

4.2.2.4. Requisitos para los cables eléctricos en los túneles

Esta especificación se aplica a todos los túneles de más de 1 km de longitud.

En caso de incendio, los cables expuestos tendrán las siguientes características: baja inflamabilidad, baja capacidad de propagación del fuego, baja toxicidad y baja densidad de humos. Estos requisitos se cumplen si los cables satisfacen como mínimo los requisitos de la clase B2CA, s1a, a1, definidos en la Decisión 2006/751/CE de la Comisión.

Figura 25. Texto recogido en la ETI de túneles ferroviarios [16].

En este caso, además de tener que comprobar que el cable cumple las características típicas de una instalación convencional de telecomunicaciones, hay que asegurar que cumple también las características de baja inflamabilidad y propagación del fuego. Consultando la hoja de características del fabricante se obtiene que éstas son: *B2ca s1a d0 a1*, por lo que el cable sería apto para la instalación. El significado de estas letras es el siguiente: *B2* hace referencia a la clase de rendimiento contra el fuego, *ca* a que es un cable, *s1* indica que genera poco o ningún tipo de humo, y *d0* significa que no gotea partículas a alta temperatura (véase la Figura 26).









| Smoke opacity | | Droplets | | Acidity | |
|---------------|---|----------|---|---------|---|
| s1 |  | d0 | / | a1 |  |
| s2 |  | d1 |  | a2 |  |
| s3 |  | d2 |  | a3 |  |

Figura 26. Infografía referente al Reglamento de Productos para la Construcción (*Construction Product Regulation, CPR*) de los cables obtenida de [17].

3.1.2 Recepción de acopios de materiales

Los acopios es la forma en la que la empresa contratista pide permiso para la adquisición de materiales para la obra, de manera que reciba el visto bueno por parte de la dirección de obra y proceda a comprar el material. Para este proceso, la empresa contratista facilita la documentación técnica de los equipos que va a instalar, y afecta a la mayor parte de unidades, como por ejemplo las torres, los equipos de radio, los armarios de energía o los equipos de climatización de las casetas.

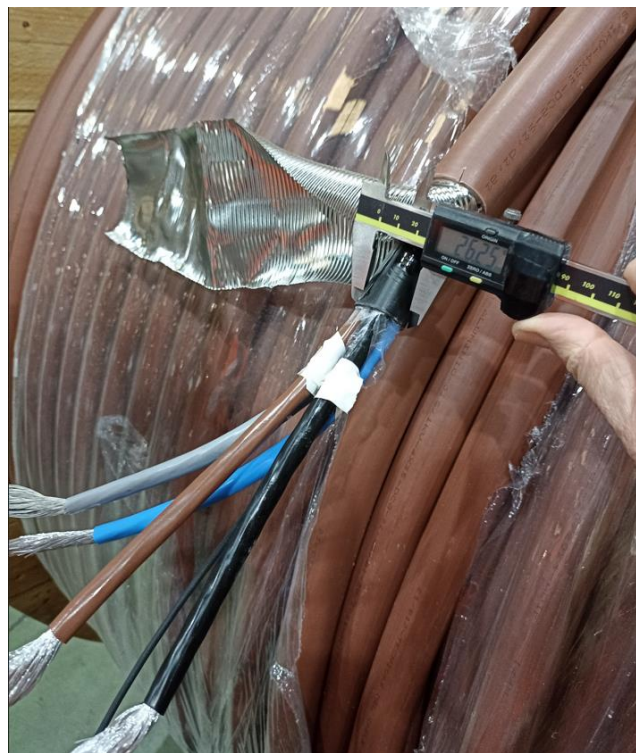


Figura 27. Pruebas en fábrica sobre una bobina de cable de energía de $4 \times 35 \text{ mm}^2$.

Normalmente, cuando la empresa contratista ejecuta la compra y recibe el material procede a acopiarlo en un terreno o nave de Adif, de manera que la asistencia técnica comprueba que este material está en buen estado. Además, en los cables principalmente, se está presente en el momento que hacen las pruebas correspondientes a las bobinas dentro de las mismas instalaciones de la empresa que los fabrica. En estas pruebas, de las cuales se muestra una fotografía en la Figura 27, se comprueban características constructivas, como el espesor de cada conductor, aislamiento, armadura exterior o

cubierta, así como características eléctricas como la resistencia máxima del conductor o el aislamiento entre los conductores. Una vez realizadas las pruebas se emite un informe con el resultado de las mismas, tal y como se muestra en la Figura 28.

| | | | | |
|--|--|---------------------------------------|----------------------------------|----------|
| CUBIERTA INTERNA BAJO ARMADURA | TIPO | Polioléfina-FR-LS-HF | | OK |
| | ESPESOR (mm) | 1,2 | | 1,54 OK |
| CONDUCTOR CONCÉNTRICO | MATERIAL | | | |
| | SECCIÓN (mm ²) | | | |
| ARMADURA | TIPO | Fleje de acero estañado corrugado | | |
| | COBERTURA (%) | 100 | | |
| CUBIERTA EXTERIOR | TIPO | Polioléfina Termoplástica FR-LS-HF | | OK |
| | ESPESOR (mm) | 2 | | 2,53 OK |
| TEMPERATURA SERVICIO (°C) | 90 | TENSIÓN SERVICIO | 0,6/1kV | OK |
| TEMPERATURA CORTOCIRCUITO (°C) | 250 | TENSIÓN PRUEBA | 3500 V | OK |
| INTENSIDAD MAX. AL AIRE 40°C (A) | | DIÁMETRO BAJO PANTALLA APROX.(mm±10%) | | |
| INTENSIDAD MAX. ENTERRADO 25°C (A) | | DIÁMETRO BAJO ARMADURA APROX.(mm±10%) | 25,3 | 25,29 OK |
| RESISTENCIA MÁX CONDUCTOR 20°C (Ω/Km) | 0,443 | OK: 0,408 | DIÁMETRO EXTERIOR APROX.(mm±10%) | 31,8 |
| RESIS.MÍN AISLAMIENTO (KI) 20°C(GOhm) (Fase-Fase) | >17 | OK | RADIO CURVATURA MÍN (mm) | 318 |
| RESIS.MÍN AISLAMIENTO (KI) 20°C(GOhm) (Fase-Arma.) | >7 | OK | | |
| | | PESO CABLE (Kg/Km) | 1060,87 | |
| MARCADO OK | ■ - TECNICAS DEL CABLE - RZ1F3Z1-K(A5) - ALUMINIO - 0,6/1kV - 2X70 - B2ca-s1a,d1,s1 - ■ - ADIF | | | |

Figura 28. Extracto del informe de las pruebas del fabricante.

3.1.3 Caracterización de elementos radiantes

En los proyectos de GSM-R se utilizan diferentes elementos radiantes, teniendo en cuenta las características geográficas de la traza del ferrocarril. Habitualmente se utilizan antenas de tipo panel, de bajo impacto visual y alta ganancia en tramos exteriores, priorizando las antenas de mayor ganancia en tramos rectilíneos, mientras que si se trata de zonas un poco más curvilíneas se utilizan antenas con un haz a 3dB más ancho. Este tipo de antenas se colocan normalmente en torres o mástiles similares a los de telefonía móvil, pero también es común encontrarse estas antenas en las bocas de los túneles, apuntando hacia fuera.

Dentro de los túneles se utilizan dos tipos diferentes de elemento radiante para proporcionar cobertura en el interior. Si además de los tubos principales hay que dar cobertura a los servicios de emergencias, la solución típica es el uso de cable radiante, que se trata de un cable con ranuras que radia uniformemente. Si no hay que radiar en las galerías entonces se suele emplear un tipo de antenas denominadas logoperiódicas que tienen mejor rendimiento en los túneles que las de panel.

En el contexto de este TFM se ha llevado a cabo la caracterización en cámara anecoica de los elementos radiantes (antenas y cable radiante) que finalmente se están instalando

en el proyecto de GSM-R. Una cámara anecoica es un dispositivo de medida de antenas, en la que se enfrenta la antena que se quiere caracterizar a una sonda que recibe la potencia emitida por la antena bajo examen para diferentes ángulos entre ambas antenas. El grupo de investigación Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Oviedo dispone, dentro de sus instalaciones para la caracterización y medida de antenas, de una cámara anecoica en la cual se han realizado las medidas que se presentan en este Capítulo. En las Figura 29 a Figura 31 se muestran algunas fotografías tomadas durante la realización de las medidas en cámara anecoica en el mes de mayo de 2022. Estas medidas se han realizado en la banda de frecuencias centrada en 900 MHz.

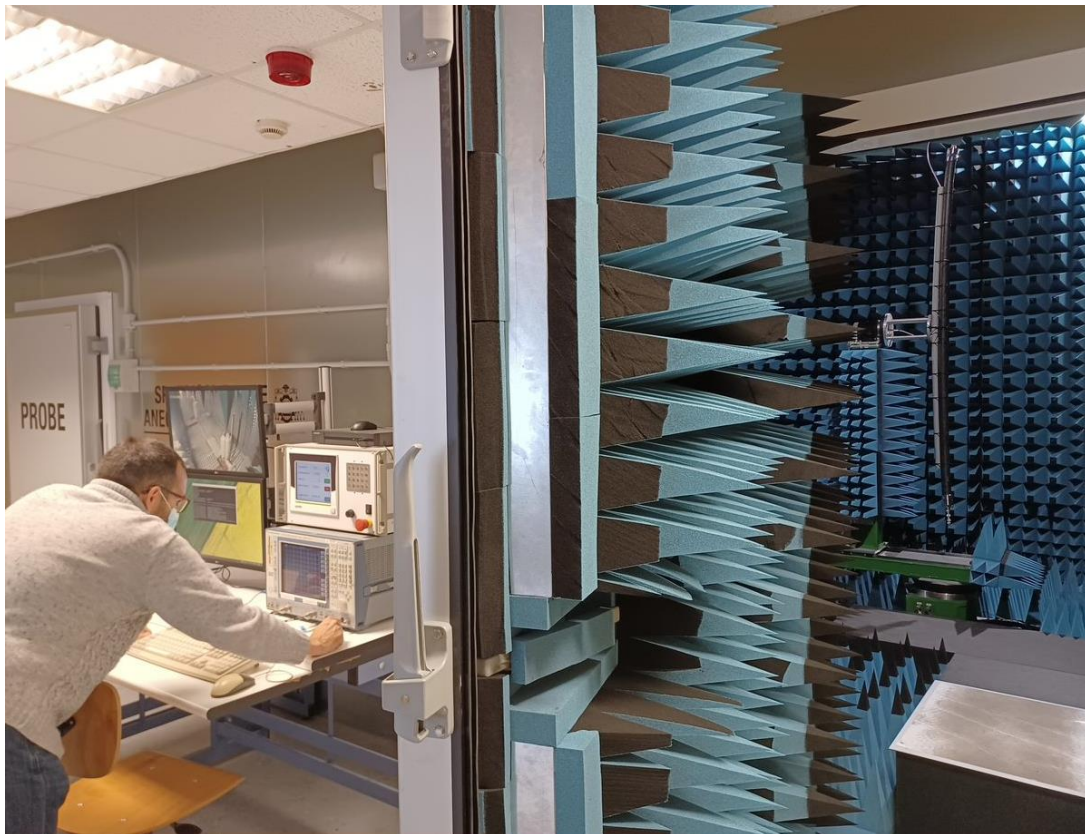


Figura 29. Fotografía en la que se muestra la situación general de la cámara anecoica mientras se prepara una medida. En la parte derecha de la imagen se puede ver el cable radiante montado ya dentro de la cámara anecoica para su medida.



Figura 30. Vista del panel de instrumentación para el control de la cámara anecoica.

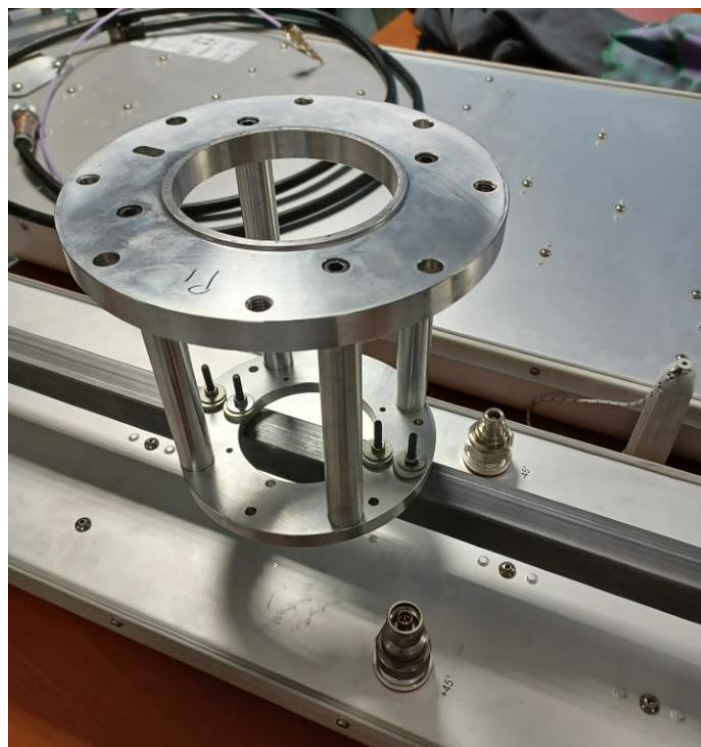


Figura 31. Fotografía de uno de los sistemas de anclaje empleados para la sujeción de las antenas al posicionador de la antena bajo medida del rango esférico en cámara anecoica del grupo TSC de la Universidad de Oviedo. En este caso, el anclaje corresponde al empleado para la sujeción de la antena de panel.

El empleo de antenas de tipo panel es habitual en la infraestructura de las redes de telefonía móvil. Como se observa en las Figura 32 a Figura 34, su diagrama de radiación se caracteriza por presentar una variación en elevación que se puede aproximar por una función de tipo cosecante cuadrado. Esta antena está diseñada para presentar este tipo de diagrama de radiación, ya que, pese a que la mayor parte de la radiación se emita hacia delante de la antena, existe una gran contribución apuntando en diagonal hacia el suelo. Esto se hace así para que la mayor parte de la radiación se dirija hacia la zona donde se van a encontrar los usuarios, en este caso la traza del ferrocarril. El lóbulo secundario daría cobertura a los usuarios que se encuentren a unas distancias medias o cortas, mientras que el lóbulo principal apunta hacia zonas más alejadas del emplazamiento.

Antena de panel modelo X65

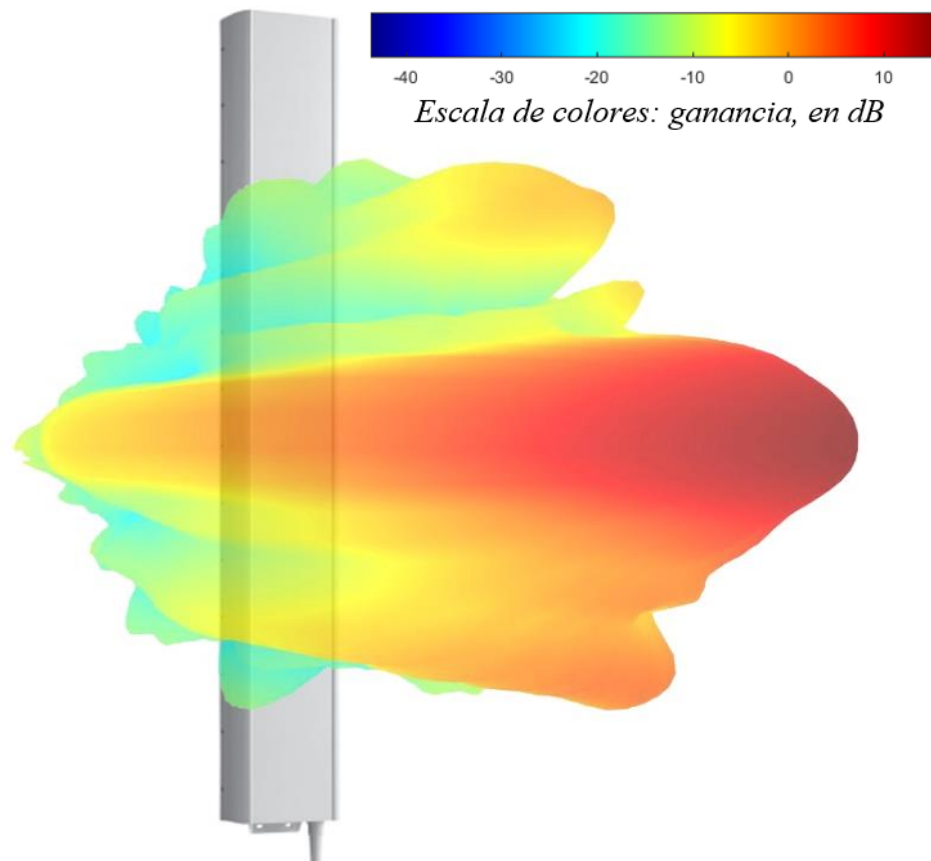


Figura 32. Fotomontaje con la antena de panel y su diagrama de radiación medido a 900 MHz.

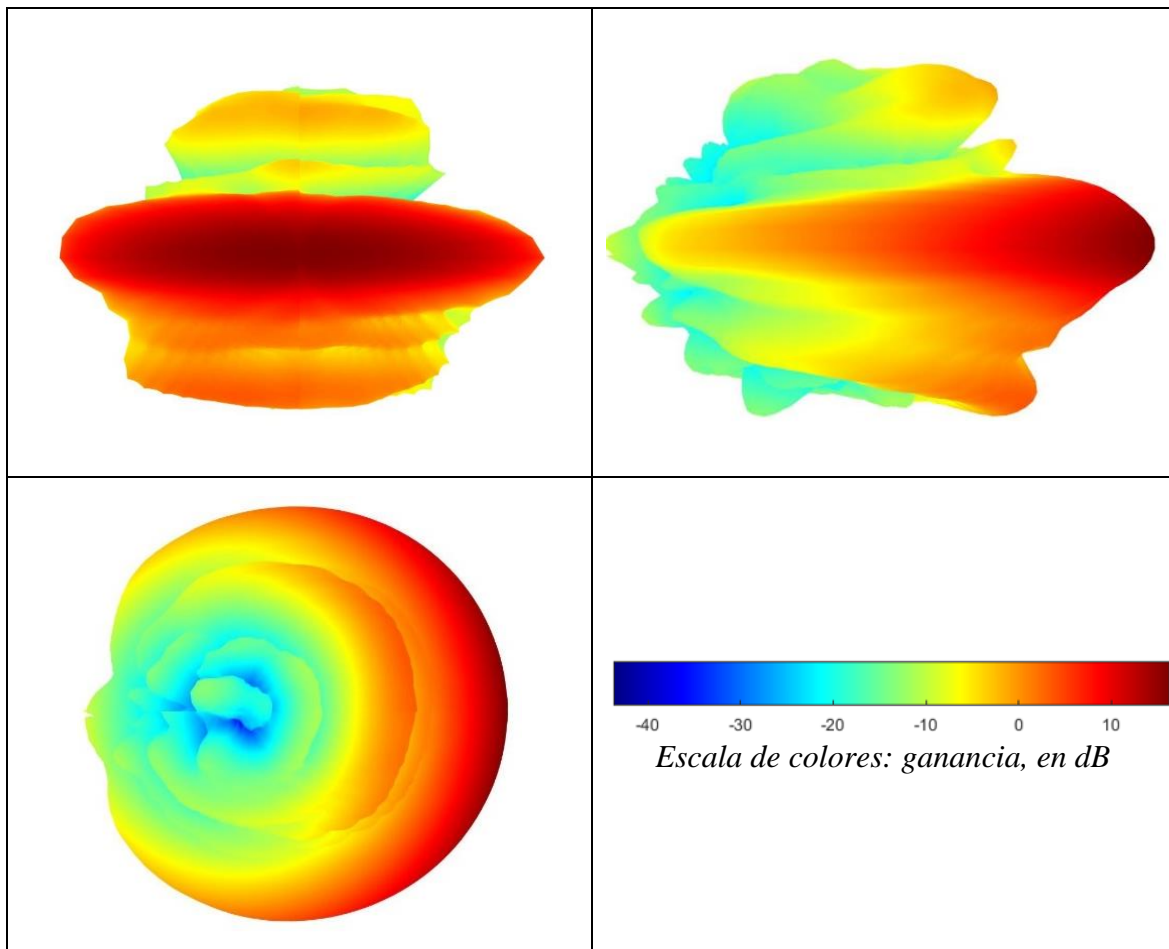


Figura 33. Diagrama de radiación tridimensional de la antena de panel (modelo X65), visto desde diferentes posiciones. Arriba a la izquierda, plano ZY, frontal a la antena; arriba a la derecha, plano XZ, lateral a la antena; abajo a la izquierda, plano XY, desde arriba de la antena.

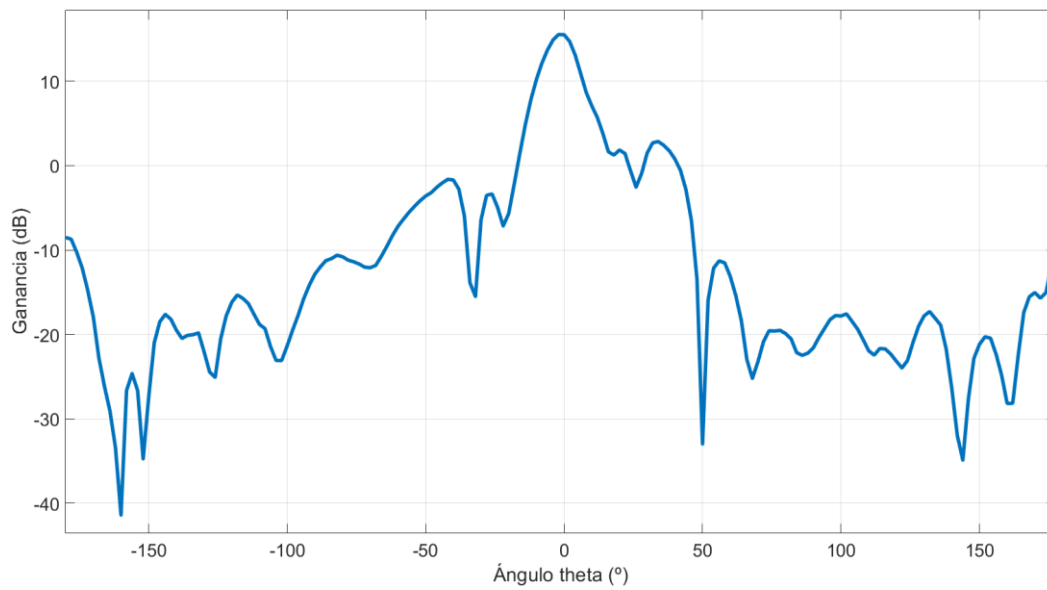


Figura 34. Antena de panel, modelo X65. Diagrama de radiación para el corte $\varphi = 0^\circ$.
Coordenadas cartesianas.

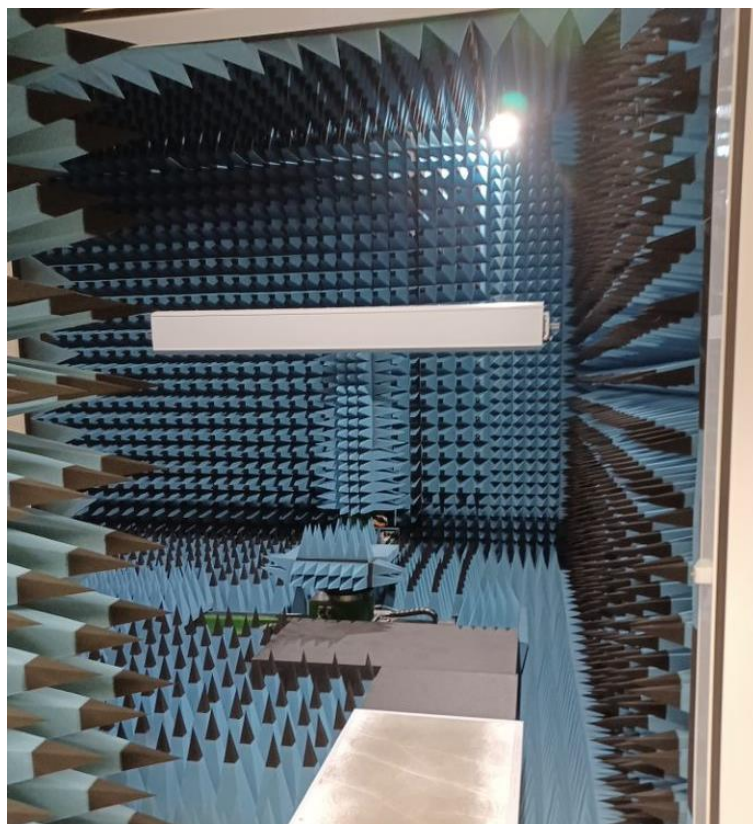


Figura 35. Antena de panel una vez instalada para su medida en el rango esférico en cámara anecoica del grupo TSC de la Universidad de Oviedo.

Antena logoperiódica de polarización vertical

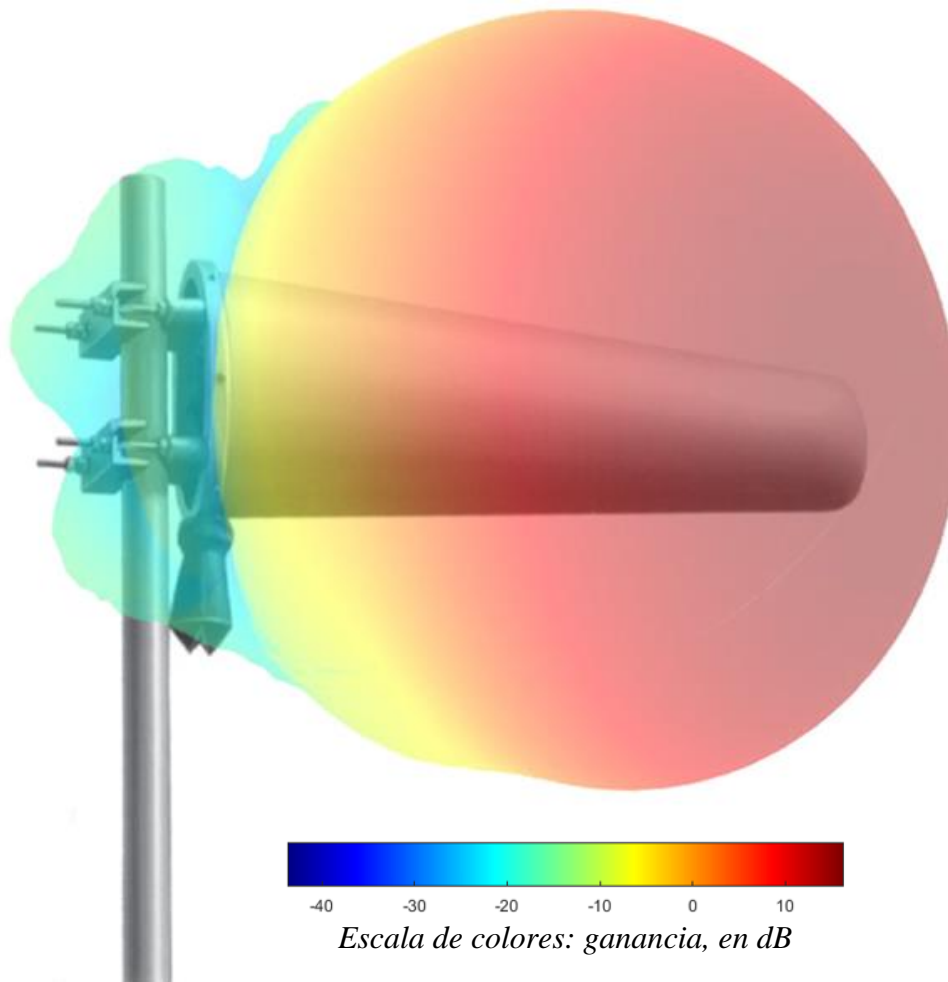


Figura 36. Fotomontaje con la antena logoperiódica y su diagrama de radiación medido a 900 MHz.

Con respecto a la antena logoperiódica, empleada para proveer de cobertura a galerías y túneles (como alternativa al cable radiante), el diagrama de radiación a 900 MHz se muestra en las Figura 37 a Figura 39. Se observa que el diagrama de radiación es directivo, focalizando la radiación en una determinada dirección.

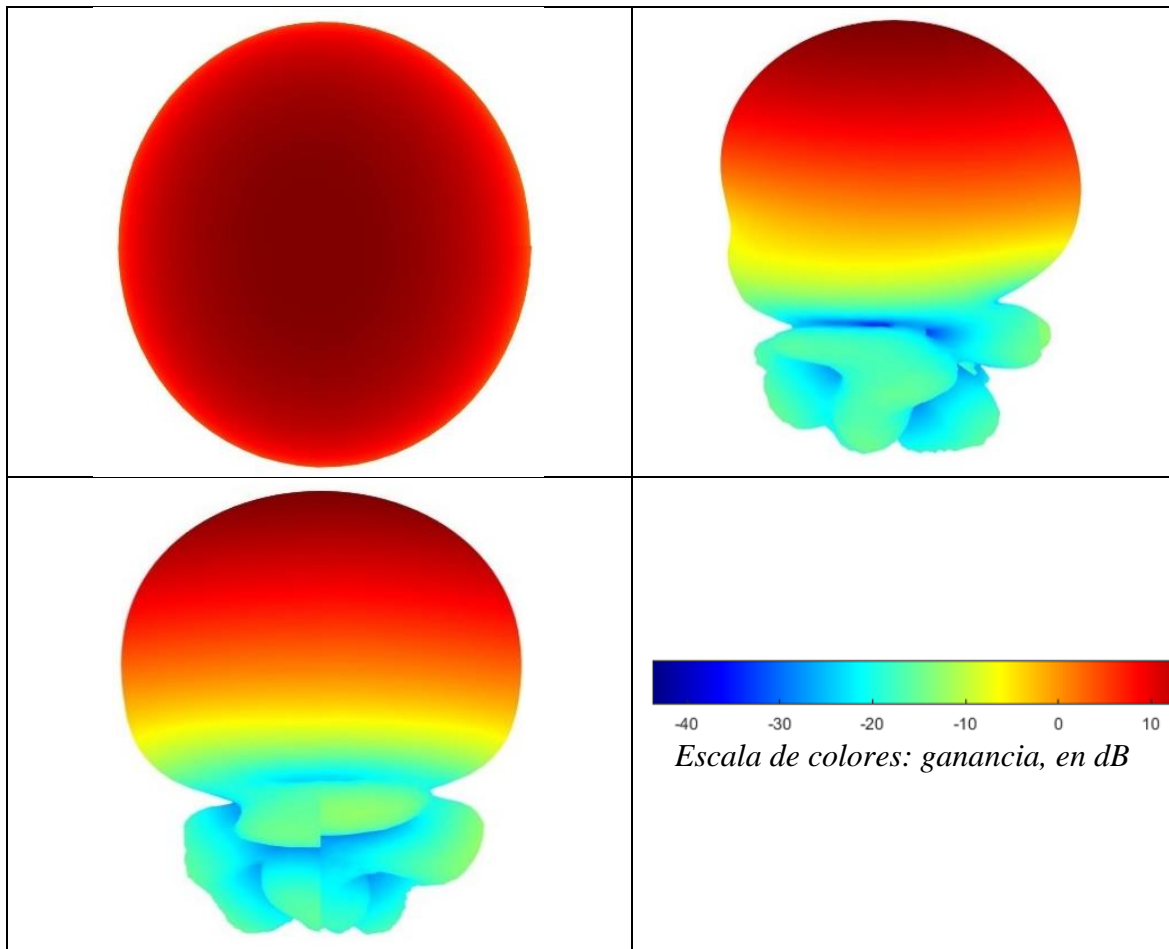


Figura 37. Diagrama de radiación tridimensional de la antena logoperiódica, visto desde diferentes posiciones. Arriba a la izquierda, plano ZY, frontal a la antena; arriba a la derecha, plano XZ, lateral a la antena; abajo a la izquierda, plano XY, desde arriba de la antena.

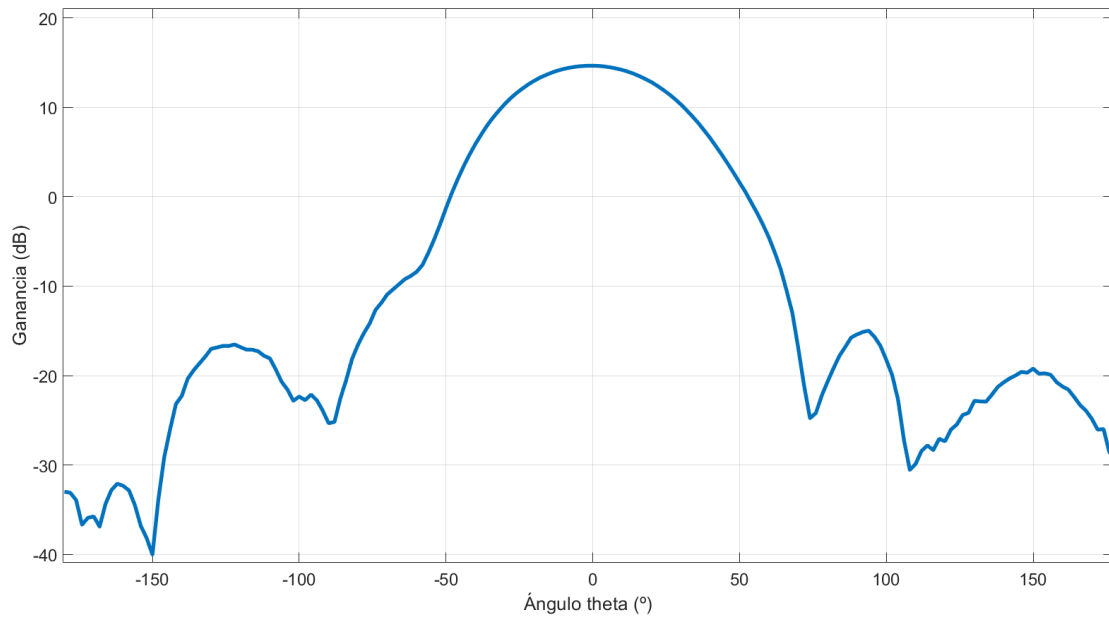


Figura 38. Antena logoperiódica. Diagrama de radiación para el corte $\varphi = 0^\circ$. Coordenadas cartesianas.

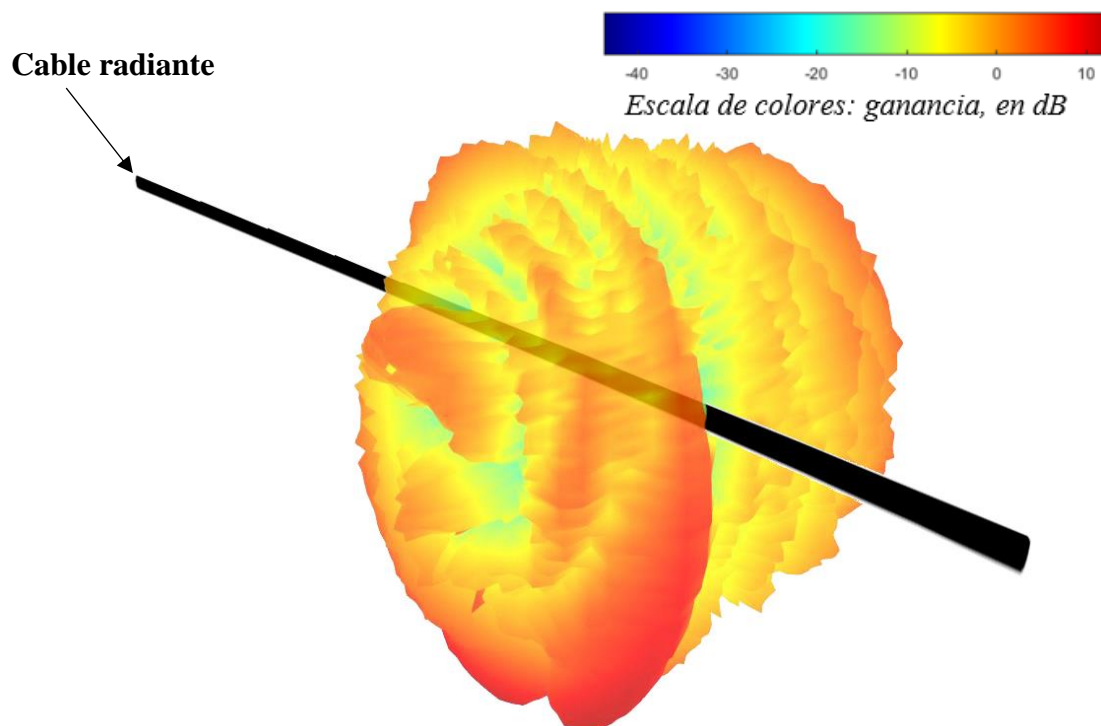


Figura 39. Fotomontaje con el cable radiante y su diagrama de radiación medido a 900 MHz

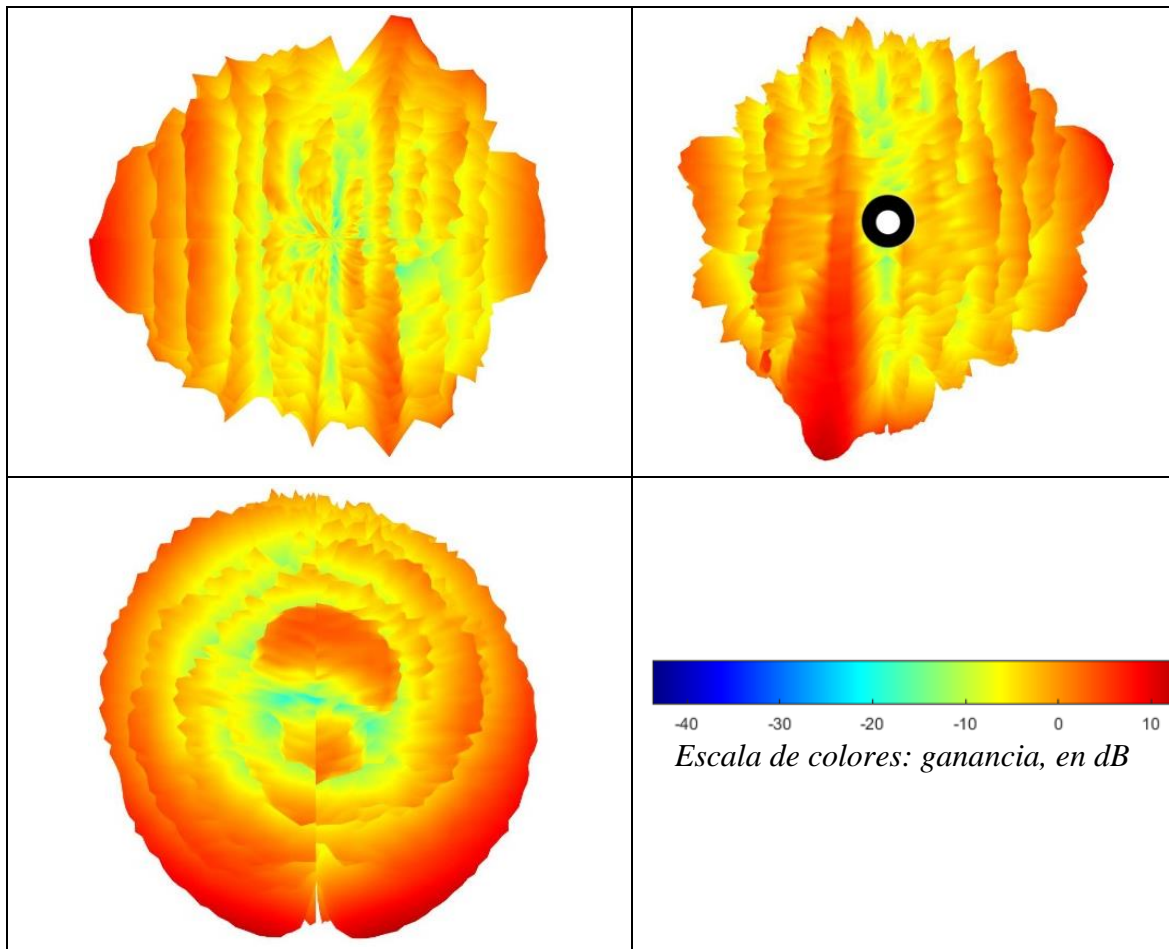


Figura 40. Diagrama de radiación tridimensional dl cable radiante, visto desde diferentes posiciones. Arriba a la izquierda, plano ZY, frontal a la antena; arriba a la derecha, plano XZ, lateral a la antena; abajo a la izquierda, plano XY, desde arriba de la antena.



Figura 41. Aspecto de un cable radiante con la cubierta retirada.

Las medidas del cable radiante, cuyo diagrama se muestra en la Figura 39 y en la Figura 40, se realizaron sobre un retal de unos 2 metros de largo, pero las condiciones reales de este elemento radiante en los túneles consisten en tiradas de cientos de metros. Un cable radiante se puede estudiar como un *array* de elementos menores, como se aprecia en la Figura 41, donde se observan las ranuras o *slots*, espaciados uniformemente, que presentan estos cables en el conductor externo.

Según la teoría de *arrays*, si se colocan estos elementos de manera longitudinal, el resultado debería ser una antena mucho más directiva que la original, sobre todo si estamos teniendo en cuenta cientos o miles de elementos.

La realidad es que el comportamiento de este tipo de antenas distribuidas no es así, ya que si fuese de esta manera se tendría un punto máximo de radiación en el centro de la tirada del cable con una ganancia muy alta. Sin embargo, el funcionamiento del cable se puede explicar mediante una analogía con un sistema de riego por goteo, donde la mayor parte de la potencia inyectada al cable viaja por dentro del mismo, radiándose un pequeño porcentaje de la potencia inyectada en cada ranura o *slot*.

La razón de este comportamiento es que, a medida que un *array* dispone de más elementos, también aumenta su tamaño eléctrico y, por tanto, aumenta la distancia a la que se conforma el diagrama de radiación. Por tanto, para un tramo de cable eléctricamente largo, con muchos elementos radiantes, se trabaja en la región de campo cercano, que en este caso genera un campo uniforme en amplitud y con fase lineal progresiva, como se puede observar en la Figura 42. Es decir, que el empleo de un cable radiante eléctricamente largo para dar cobertura a una galería resulta en un campo bastante uniforme dentro de dicha galería.

Otro efecto curioso observado en la realización de las medidas en cámara anecoica es que para la banda de frecuencias a la que se analizó el cable radiante, éste tenía unas mejores características de radiación a la frecuencia de 1500 MHz que a la de 900 MHz, como se muestra en la Figura 43 y en la Figura 44. Este resultado es más llamativo teniendo en cuenta que la frecuencia para la cual está diseñado, y recomendada por el fabricante es la de 900 MHz. La conclusión a la que se llegó es que, si el cable radiara un gran porcentaje de potencia por unidad de longitud (como sucede a 1500 MHz), al estar pensado el

sistema para distancias largas, podría no llegar suficiente potencia a los *slots* o ranuras situados más lejos del punto donde se inyecta la señal en el cable radiante.

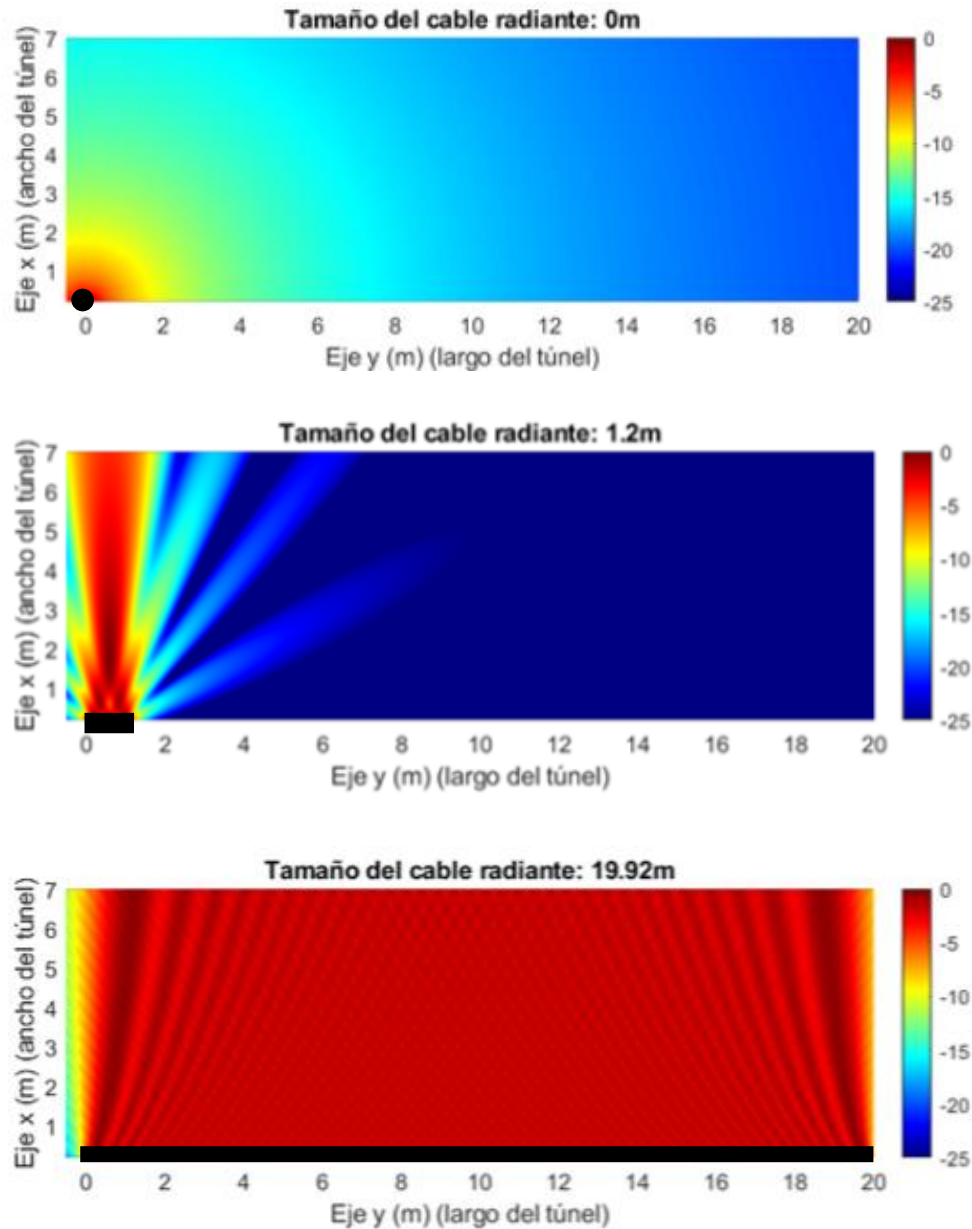


Figura 42. Efecto del aumento de la longitud de un cable radiante en un espacio confinado de 20 m de largo x 7 m de ancho. Se representa la amplitud del campo radiado, normalizada, en dB. El rectángulo negro indica la ubicación del cable radiante. En el caso del cable radiante de longitud 0 m, el resultado representado corresponde al campo radiado por una fuente puntual.

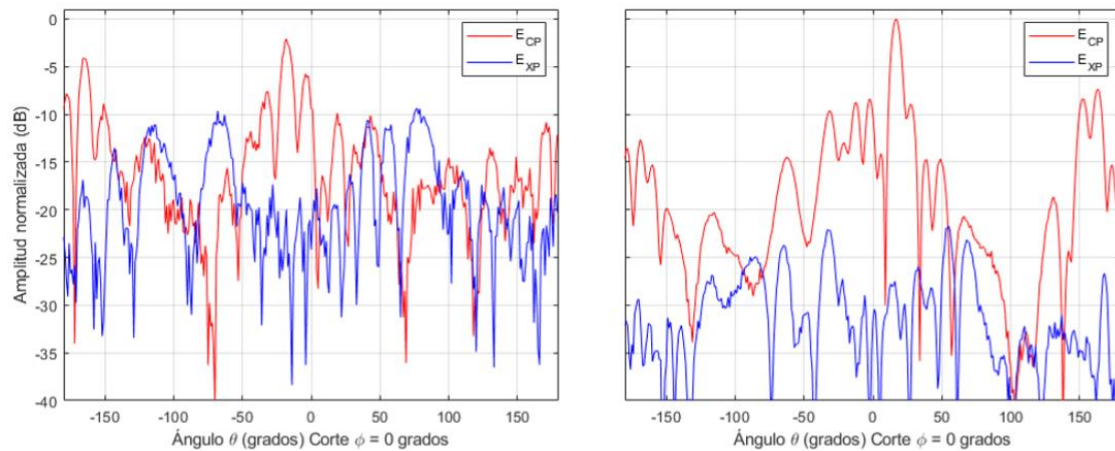


Figura 43. Diagramas de radiación del cable radiante medidos en cámara anecoica. Corte en el plano que contiene al eje del cable. Izquierda: resultados para 900 MHz. Derecha: resultados para 1500 MHz.

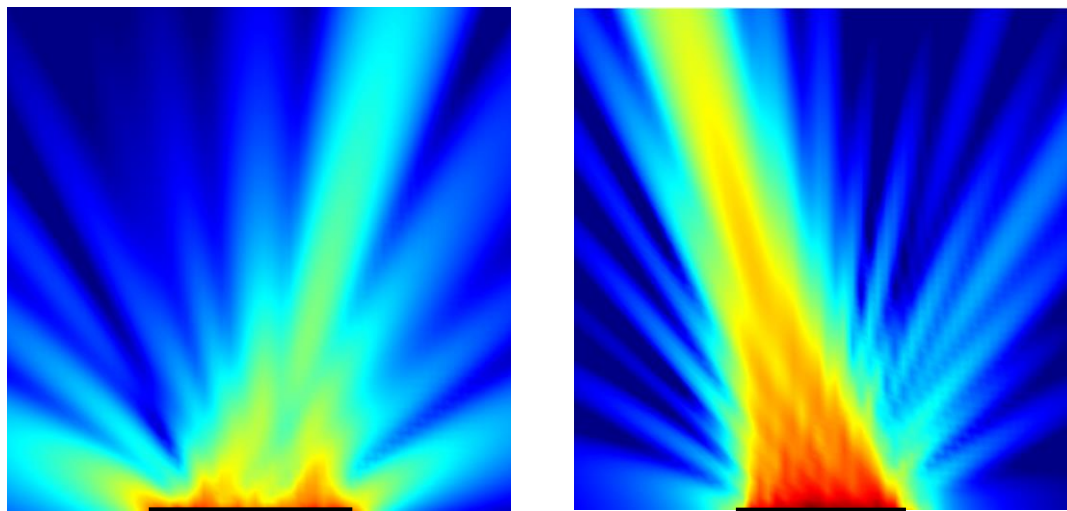


Figura 44. Campo radiado por el cable radiante de 2 m de longitud (representado por el rectángulo negro) calculado a partir de las medidas realizadas en cámara anecoica, en un dominio de 5 m x 5 m. Izquierda: campo radiado calculado a 900 MHz. Derecha: campo radiado calculado a 1500 MHz.

Adicionalmente, se han realizado medidas sobre el parámetro S_{11} , para comprobar cómo de adaptado está el cable en la banda de frecuencias estudiadas. Se obtuvo que, dentro de

la banda de trabajo, los valores del parámetro S_{11} se encuentran por debajo de -20 dB, como se puede comprobar en la Figura 45. Por tanto, se puede afirmar que el cable está bien adaptado dentro de la banda de frecuencia de operación.



Figura 45. Medida del parámetro S_{11} del cable radiante (captura de la pantalla del analizador de espectros portátil empleado para la realización de la medida).



Figura 46. Segmento de 2 m de radiante colocado en el posicionador del rango esférico en cámara anecoica del grupo TSC-UNIOVI para la realización de la medida del campo radiado.

3.2 Trabajos durante las pruebas, validación y puesta en servicio

3.2.1 Pruebas durante la instalación

Una vez que se terminan los trabajos de obra civil e instalación de equipos hay que validar que todo cumpla normativa para poder empezar a inyectar las señales de radiofrecuencia. La empresa contratista suele hacer un control de calidad propio, previo al que se realiza para dar por bueno un emplazamiento junto con la parte del promotor. Este control de calidad previo se suele realizar como último elemento de la instalación y se realiza por parte del equipo instalador.

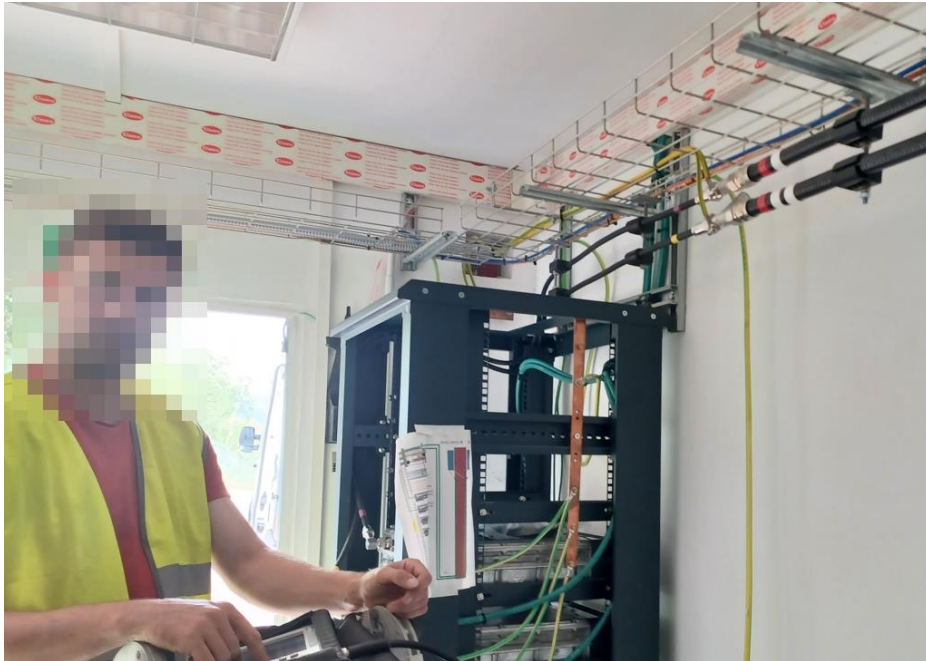


Figura 47. *Setup* de medida de las pérdidas de retorno para el control de calidad de la instalación. Se conecta a los conectores del sistema radiante que llega hasta las antenas.

Como ejemplo tenemos la comprobación del sistema radiante, incluyendo todos los coaxiales y elementos pasivos intermedios: latiguillos, *splitter* de dos salidas, el propio cable coaxial, los conectores, kits de tierra y el descargador. En el pliego de prescripciones técnicas se especifica las características que debe cumplir el sistema.

En dicho control de calidad se comprueba que los materiales cumplen tanto la normativa como las especificaciones técnicas requeridas por Adif, midiéndose las pérdidas permitidas por atenuación e inserción de los distintos elementos de radiofrecuencia, se comprueba también que los conectores sean compatibles con los equipos, o que la potencia permitida de los elementos sea suficiente para la aplicación final.

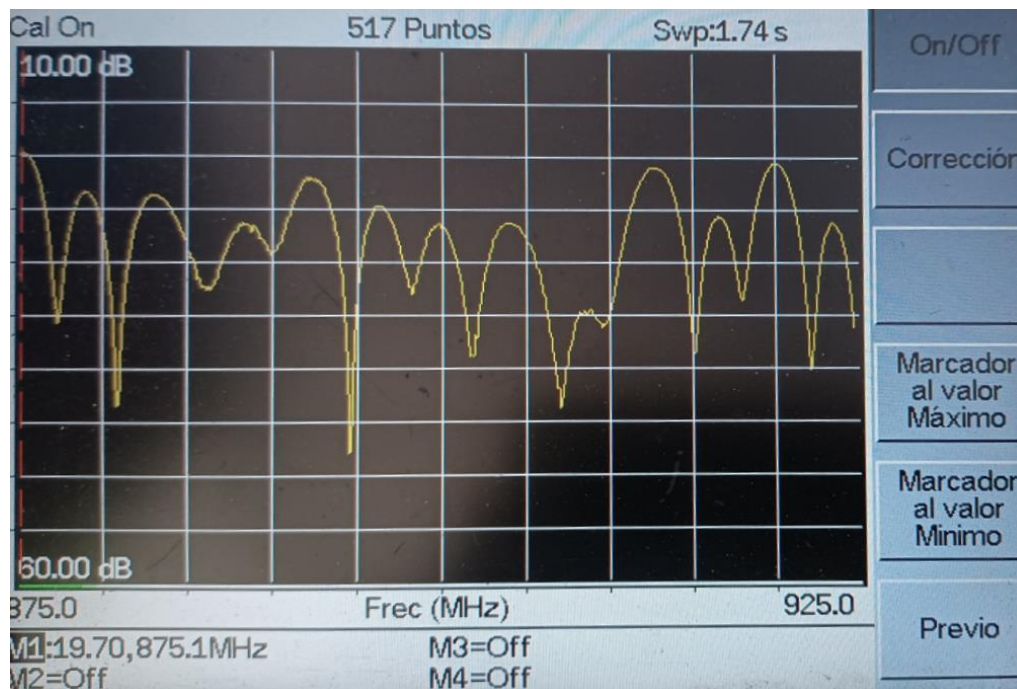


Figura 48. Medida del analizador de redes para el cálculo de las pérdidas de retorno.

Una vez finalizado todo el proceso de control de calidad, se procede a medir las pérdidas de retorno [13] desde el conector que irá conectado finalmente al equipo. Para realizar estas medidas se emplea un analizador vectorial de redes configurado para realizar medidas en la banda de frecuencias de trabajo: en este caso, entre 875 y 925 MHz. El valor admisible de pérdidas de retorno debe ser mayor o igual a 15 dB. En la Figura 48 se puede comprobar que este valor se cumple, ya que el marcador al máximo valor está situado en 19,70 dB, como se puede comprobar en la parte inferior de la captura. Si este valor no estuviera dentro de los parámetros indicados, el propio equipo de medida tiene una característica para determinar la distancia al fallo que genera unas pérdidas de retorno fuera del rango admisible. Para ello se emplea una técnica de análisis en el dominio del tiempo, consistente en la propagación inversa de las medidas tomadas en el extremo del

cable, técnica conocida como *Time-Domain Reflectometry* (TDR) [14]. Una vez determinada a qué distancia se encuentra el fallo, los instaladores pueden acudir aproximadamente al lugar del problema.

3.2.2 Pruebas previas a la puesta en servicio

Llegado el momento en el que todos los equipos están instalados y están preparados para radiar, se procede a la integración en la red de GSM-R de Adif, con la planificación de frecuencias asignada a cada elemento de radio. Una vez estén los equipos radiando correctamente, se procede a la optimización de la red, utilizando múltiples pasadas con trenes equipados con radios de GSM-R integradas en la cabina.

El objetivo de esta optimización es realizar pequeñas modificaciones para que el sistema funcione mejor: que los *handover* se produzcan correctamente, ajustar el ángulo de las antenas para cubrir mejor una zona en concreto o incluso instalar algún elemento nuevo por si aparece una zona sin cobertura.

En la Figura 49 se muestra el resultado de estas medidas en un tramo con túneles, viaductos, donde las antenas de panel se han colocado en exteriores, mientras que en los túneles se ha empleado cable radiante.. En el eje vertical se muestra la potencia recibida, en dBm, mientras que el eje horizontal muestra el número de la muestra recibida. Se ha de indicar que no existe una relación lineal entre el número de muestra y la distancia en metros. Esto implica que la distancia en metros entre dos muestras adyacentes no tiene porqué ser constante en la gráfica, solamente sería así si las muestras se toman con un período de muestreo y velocidad constantes. En este caso, en la zona izquierda de la imagen se ven zonas con curvas con menos pendiente, en las que el tren probablemente se desplazase más despacio, mientras que en la parte central da la sensación de que sí que puedan estar más o menos equiespaciadas.

En la zona central de la Figura 49 se pueden observar curvas de diferente color, donde cada una de estas curvas representa la potencia recibida de una señal portadora de diferente frecuencia. Así, en el máximo de cada curva es donde se encuentra cada una de

las cabezas remotas que emiten la señal medida. Analizando el comportamiento de estas señales (variación del nivel de potencia en unidades logarítmicas), se puede diferenciar dos tipos:

- Señales con caída lineal (en unidades logarítmicas): presenta una apariencia de dientes de sierra, con los picos y valles equiespaciados aproximadamente, teniendo todos los máximos la misma potencia. En la Figura 49 son el conjunto de señales situadas dentro del rectángulo con línea continua.
- Señales con caída curva (en unidades logarítmicas): esta caída es mucho más pronunciada cerca del máximo, y cuando se separa de ésta se va volviendo más plana. Si se compara con el otro tipo de señal llama la atención por las rápidas oscilaciones del nivel de potencia dentro de la tendencia de la curva. En la Figura 49 son el conjunto de señales situadas dentro del rectángulo con línea discontinua.

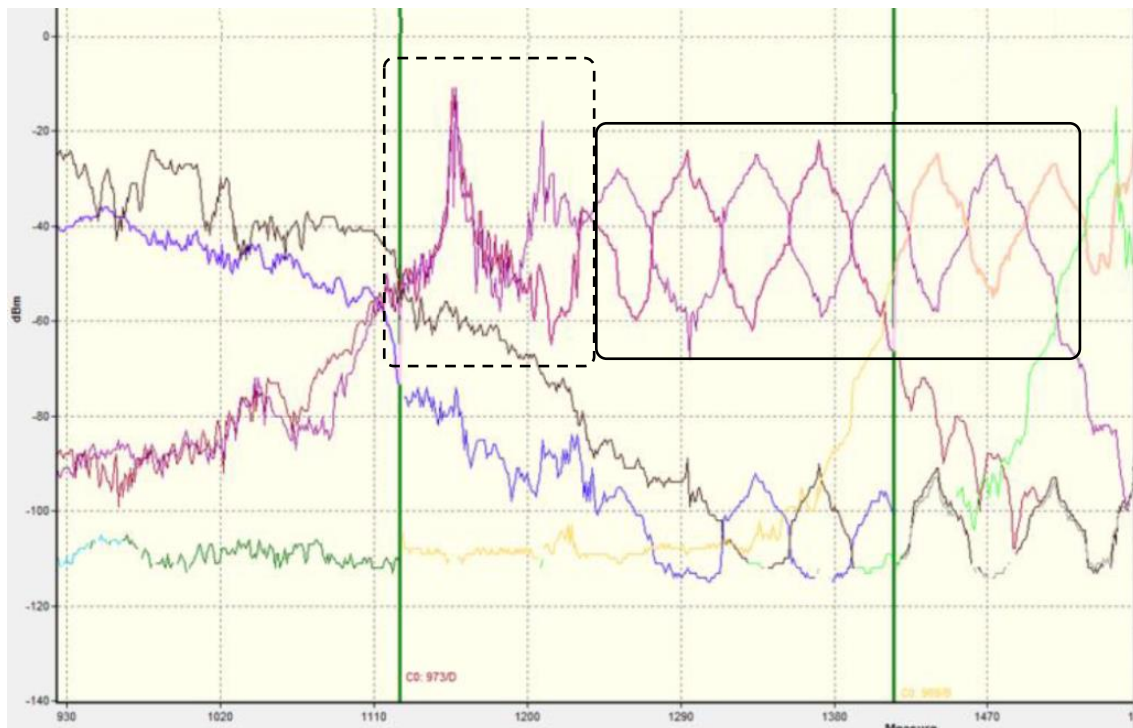


Figura 49. Medidas realizadas durante la optimización de una línea de Alta Velocidad. Dos ejemplos de señales con caída curva se han resaltado dentro del rectángulo con trazo discontinuo, mientras que los ejemplos de señales con caída lineal se muestran dentro del rectángulo con trazo continuo.

Análisis de las medidas:

Transmisión por cable radiante:

Las curvas de señal con un aspecto más lineal corresponden a emplazamientos con una instalación con cable radiante, y se pueden apreciar mejor en el detalle de la Figura 50. Los emplazamientos de las cabezas remotas de las diferentes capas están intercalados, por eso se ven dos sierras de dientes de colores diferentes. Es común utilizar varias cabezas remotas a modo de repetidor, por lo que existen esos diferentes picos del mismo color. Además, vemos que estos picos (incluidos los de la otra capa) están bastante equiespaciados. Esto es así porque las distancias de las galerías transversales, que es donde se suele hacer la instalación de estos equipos de radio, suelen estar a una distancia de unos 500 metros con las galerías aledañas.

Esta solución con cable radiante se suele proponer en los casos en los que las galerías también tienen que tener cobertura suficiente.

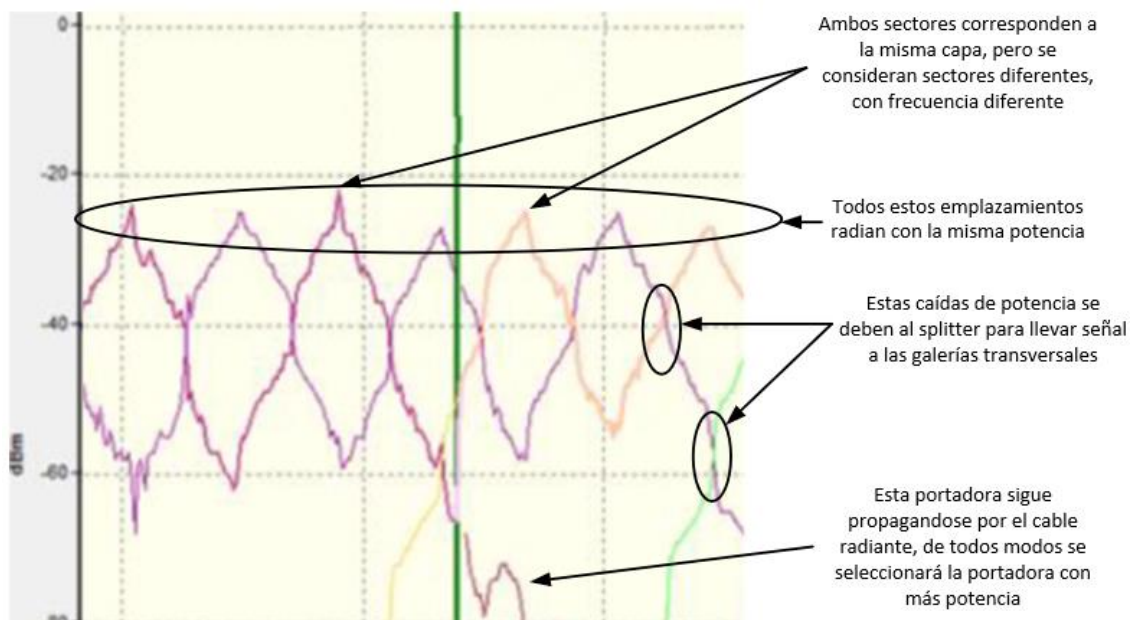


Figura 50. Detalle y explicación de las medidas en un túnel con cable radiante.

Cuando se cruzan curvas de diferentes colores, correspondientes a diferentes capas, se aprecia una ligera caída de potencia. Esto es debido a que el cable radiante se conecta con las galerías mediante un splitter, lo que justifica esa ligera caída.

Transmisión por antenas:

Es la solución más convencional para los sistemas radiantes. En la Figura 51 se muestra un detalle de las medidas en un tramo con este sistema. Se puede apreciar varias portadoras en este tramo, las de más potencia para cada capa y también de las celdas vecinas. La curva tiene una pendiente más abrupta que se va volviendo más horizontal a medida que se aleja de la antena transmisora. La diferencia con respecto al cable radiante es que la propagación en espacio libre se hace sobre un espacio tridimensional, mientras que la propagación de la señal en el otro caso se produce a través de un medio guiado como es un cable coaxial.

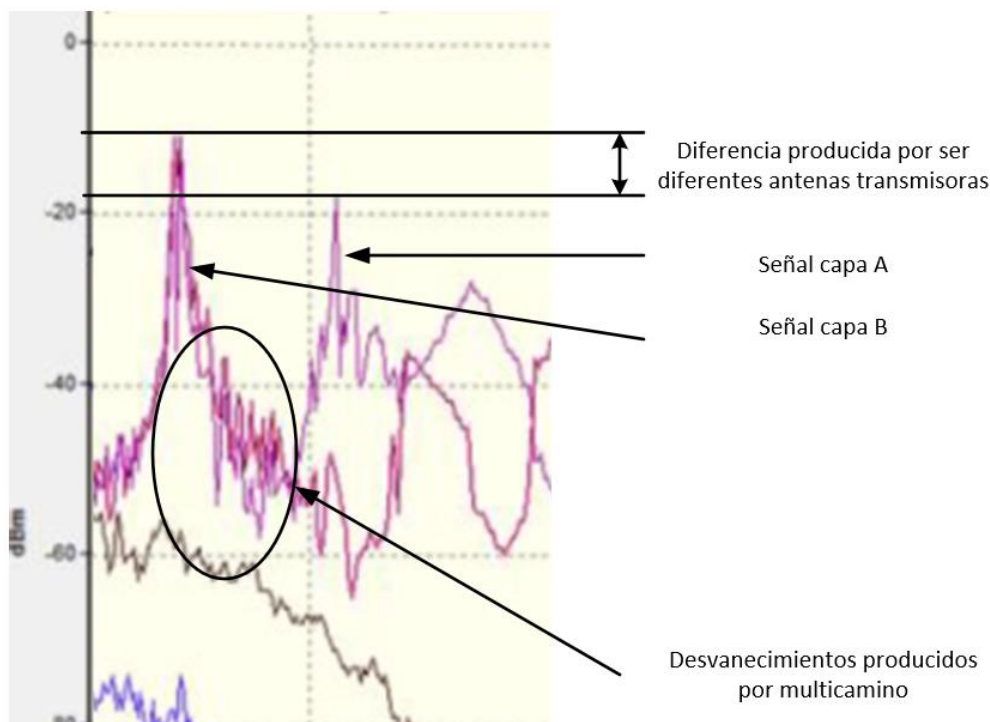


Figura 51. Detalle de las medidas con antenas convencionales.

Si solo se tiene en cuenta la contribución de potencia del rayo principal, estas pérdidas de propagación (L_{bf}) vienen dadas por la ecuación (3.1), en base a la recomendación UIT-R P.525-4 [15]:

$$L_{bf} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{f} \right) \quad (3.1)$$

Donde d es la distancia en metros y f la frecuencia en Hertzios. Para una frecuencia dada se observa que el comportamiento de las pérdidas es proporcional con el cuadrado de la distancia, en concordancia con el comportamiento de las medidas para este caso.

Por otro lado, se observa que las curvas de las medidas del sistema radiante con antenas tienen unas oscilaciones sobre esta curva logarítmica de pérdidas. Esto es debido a los desvanecimientos provocados por la influencia del fenómeno de multicamino.

En la Figura 52 se muestra el motivo por el cual es más crítico el multicamino en el caso de las antenas convencionales. En el caso del cable radiante, la radiación es perpendicular al eje del cable, el cual a su vez es paralelo al trazado del túnel. Las antenas, sin embargo, se orientan para que el lugar de máxima radiación sea paralelo a las paredes del túnel. En el receptor, la contribución directa, de mayor potencia, se ve interferida por el resto de las señales rebotadas en las paredes de un túnel, que a veces se sumará en fase (en este caso, el nivel de potencia recibida será mayor que con únicamente la contribución directa), y otras veces, cuando se suma en contrafase, será menor que la potencia recibida sin considerar el multicamino.

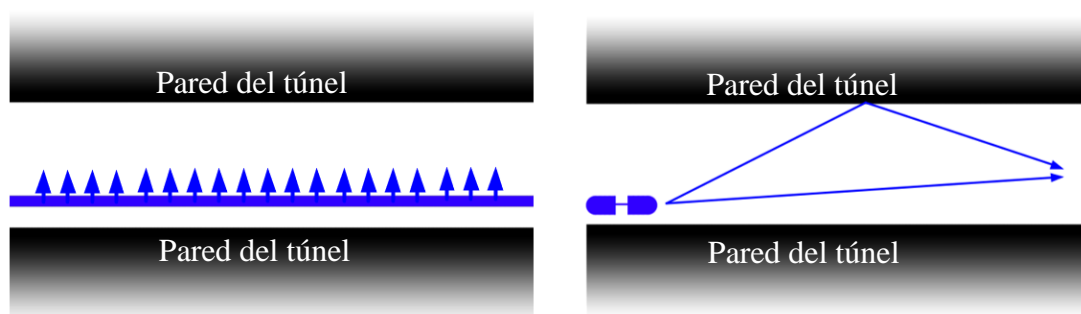


Figura 52. Esquema que resume las diferencias de radiación entre cable radiante (izquierda) y antenas (derecha) en el interior de un túnel.

4 Seguimiento presupuestario y de programación

Dos de los documentos que se realizan en el proyecto constructivo son el pliego de prescripciones técnicas y el presupuesto, que describen de forma cuantitativa y cualitativa las propiedades de las obras a realizar. Para ello se utilizan las unidades de obra, que es la parte de una obra que se mide y cuantifica de forma independiente, y que se valoran en función de una misma unidad de medida. Por ejemplo, una unidad de obra puede ser el metro de un cable de una sección determinada, el metro cúbico de hormigón, o una antena en concreto. Para ilustrar este concepto, en la Figura 53 se muestra la unidad de obra que hace referencia a las guías de ondas y elementos asociados para el repetidor en el interior de un túnel. En la parte superior se puede ver el código que tiene Adif para esta unidad y el título, seguido de una descripción detallada de la unidad y los elementos que la conforman.

El pliego de prescripciones técnicas es un documento contractual donde se especifica las condiciones que tiene que cumplir la empresa contratista en general. Las normas para la realización de trabajos con maquinaria, los materiales, piezas y equipos a instalar, temas relacionados con la vigilancia ambiental, tratamiento y gestión de recursos, la definición de las unidades de obra, la normativa de obligado cumplimiento, donde se recoge detalladamente las normas UNE y leyes en general a la que está sujeta el proyecto, y finalmente incluye información sobre las condiciones jurídicas económicas y administrativas generales.

El proyectista lista todas las unidades de obra y su medición (cantidad) para cada emplazamiento, intentando tener en cuenta también los problemas que puedan surgir durante su ejecución. Estas unidades de obra sirven de base para el cálculo del presupuesto de ejecución material, que se puede calcular como la suma de todas las mediciones de todas las unidades de obra de cada emplazamiento, que está recogido en el documento de Presupuestos dentro del proyecto.

| | |
|---|--|
| UG30RAD102 | GUÍA - ONDAS Y ELEMENTOS ASOCIADOS PARA EL REPETIDOR EN EL INTERIOR DE UN TÚNEL (2 SECTORES). |
| <p>Conjunto de elementos para la conexión de los sistemas radiantes al equipo Repetidor en interior de túnel, con sus correspondientes medidas de certificación exigibles.</p> <p>Incluye latiguillos de cable coaxial 1/2", cable coaxial 1/2", descargadores 7/16", splitters, kits de puesta a tierra, grapas exteriores para cables, conectores, empalmes tipo C para proveer la conexión a tierra, así como pequeño material necesario para la instalación completamente terminada.</p> <p>Será de aplicación lo definido para los guía-ondas de BTS anteriores. Sin embargo para esta unidad de obra, el guía-ondas requerido deberá ser dimensionado para la instalación de guía-ondas desde repetidor de túnel a antenas en hastial de túnel (2 sectores), incluidos todos los elementos auxiliares, como pueden ser conectores, grapas, kit de tierras, pasamuros, etc, con los condicionantes del guíaondas a instalar.</p> <p>El valor admisible de potencia de retorno será menor o igual a -15 dB.</p> <p>Además, para esta unidad de obra, el guía-ondas requerido deberá ser dimensionado para presentar una atenuación máxima de 3 dB.</p> <p>Se deberá cumplir con las especificaciones técnicas vigentes y en concreto, para instalaciones en túneles de más de 1.000m con lo indicado en la ETI REGLAMENTO (UE) No 1303/2014 DE LA COMISIÓN de 18 de noviembre de 2014 sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa a la «seguridad en los túneles ferroviarios» del sistema ferroviario de la Unión Europea.</p> | |

Figura 53. Unidad de obra de ejemplo.

Cuando un proyecto de las características como el descrito en el presente TFM sale a licitación, varias empresas pueden estar interesadas en conseguirlo, para lo cual idealmente compiten entre ellas mediante una subasta privada, en la que cada una de las empresas interesadas presentan un precio, conociendo el pliego que tienen que cumplir y el presupuesto de licitación. Después de un periodo donde se califican las diferentes ofertas por el precio ofertado o experiencia en el sector, entre otros criterios, se fija el nuevo presupuesto en el de la oferta de la empresa ganadora. Normalmente, este presupuesto será más bajo que el de licitación, y el coeficiente entre uno y otro se llama baja. Este coeficiente de baja se utilizará a partir del momento en el que haya que pagar una unidad de obra, multiplicándose por el precio de ejecución material para llegar al precio a certificar. La idea de la baja es que las empresas emitan ofertas lo más competitivas posibles teniendo en cuenta la optimización de recursos. Se ha de indicar que las unidades de obra referentes al capítulo de seguridad y salud no entran dentro de este concepto de optimización, ya que se consideran necesarias para la protección de los trabajadores.

Tanto en el proyecto como en la oferta de licitación se tiene en cuenta cuál va a ser el plazo de ejecución del proyecto, existiendo planificaciones de obra mediante un diagrama de Gantt, que especifica la duración y los bloqueos por hitos de cada tarea. De esta forma se tiene una idea aproximada del estado del proyecto en términos de porcentaje de presupuesto ejecutado y la relación entre dicho presupuesto ejecutado y el presupuesto previsto. También, de cara a la administración pública, es importante saber cuánto dinero y cuándo está previsto certificar por parte de la empresa contratista.

Una vez que empieza de manera efectiva la obra, mensualmente la empresa contratista lanza una solicitud de certificación a la Dirección de Obra, que mediante a los informes y recomendaciones de la asistencia técnica, aprueba o matiza. Estas certificaciones mensuales recogen el trabajo realizado previamente por la empresa contratista, de manera que se van pagando las unidades de obra reflejadas en el presupuesto siempre que cumplan las condiciones del pliego de prescripciones técnicas. El documento en el que se encuentra el acumulado de todas las certificaciones previas se llama relación valorada, que recoge todas las certificaciones mensuales previas, y en él se puede ver un descompuesto por unidad en el que se recogen las mediciones ya pagadas. Esto es importante también para tener una idea global del estado del proyecto y ver qué porcentaje de éste se ha certificado.

Los trabajos se efectúan de manera planificada entre las técnicas, mediante reuniones de coordinación semanales tanto a nivel de dirección de obra como a nivel de empresas contratistas. Con respecto a éstas últimas reuniones de coordinación, cada empresa indica las actividades planeadas para la semana siguiente, indicando el emplazamiento dónde efectuará los trabajos y los medios que utilizará. Por ejemplo, el uso de vehículos de vía por parte de una empresa impedirá a otras empresas el trabajo con dichos vehículos de vía, ya que no podrán atravesar esa zona de trabajos, en principio, y tendrán que encarrilar estos vehículos en otra parte. Para solventar este tipo de incidencias, la Oficina de Circulación se encarga de gestionar el tráfico y ocupación de las vías durante la ejecución de la obra.

5 Conclusiones

La ejecución en campo de un proyecto de telecomunicaciones puede presentar problemas que no se pueden anticipar en la fase de redacción. Por este motivo, es necesario disponer de una asistencia técnica que pueda dar solución a todas estas eventualidades que pueden retrasar la ejecución. En este TFM se ha presentado la metodología seguida por dicha asistencia técnica en un proyecto real de despliegue de un sistema GSM-R.

Se ha podido comprobar que el campo de acción a lo largo del proyecto, desde los primeros replanteos hasta las pruebas finales de aceptación, es amplio y variado. Por ello, es importante tener una idea clara y global del proyecto en sí y de la normativa a aplicar, apoyándose para ello en los diferentes documentos asociados al proyecto.

En el caso particular del proyecto GSM-R abordado en este TFM, que forma parte de la línea de Alta Velocidad entre La Robla y Pola de Lena, existen diferencias geográficas significativas que complican aún más esta ejecución con respecto a otros tramos.

El control de la ejecución de este proyecto ha conllevado una serie de retos a nivel profesional, como es la puesta en práctica de algunas de las competencias adquiridas a lo largo de la titulación del Máster en Ingeniería de Telecomunicación. Algunas de las competencias puestas en práctica en el marco de este TFM han sido la capacidad para diseñar y evaluar radioenlaces, la capacidad para desarrollar aplicaciones web para facilitar o automatizar tareas (en este caso, geo-etiquetado de fotografías), ser capaz de adaptarse a circunstancias variables, capacidad para el trabajo en equipo y coordinarse con diferentes técnicas, capacidad para el manejo y aplicación de la normativa vigente en materia de telecomunicaciones, o la capacidad de realizar mediciones e interpretar los resultados (en este caso, medida y caracterización de elementos básicos en una instalación de comunicaciones, como las antenas y cables radiantes).

Aparte de la puesta en práctica de las competencias mencionadas, la gestión de un proyecto para un organismo público y la manera de trabajar con unidades de obra, mediciones y certificaciones, por ejemplo, son otras competencias y aprendizajes adquiridos en el marco del TFM.

Finalmente, el empleo de cable radiante como elemento para dotar de cobertura radioeléctrica a túneles y galerías ha conllevado la realización de un conjunto de análisis y simulaciones adicionales no contempladas inicialmente ni en la ejecución del proyecto ni en el TFM. Dichos análisis han permitido profundizar en el estudio del funcionamiento del mecanismo de radiación de este tipo de elemento. Los resultados y conclusiones obtenidos han sido de gran interés tanto para comprender con detalle el mecanismo de radiación del cable radiante en un escenario como el de una galería, pues no se había tenido la oportunidad de trabajar con este elemento durante los estudios de grado o máster.

6 Bibliografía

- [1] Sector ferroviario español, por la Agencia Española del Ferrocarril. Última consulta: 25/05/2022. Disponible en <http://magazine.mafex.es/wp-content/uploads/2015/04/2014-Mafex-y-el-Sector-Ferroviano-Espanol.pdf>
- [2] Especificación técnica ASFA Digital, ADIF. Última consulta: 25/5/2022. Disponible en https://www.seguridadferroviaria.es/recursos_aesf/6D28997B-4BE1-4EEC-BF21-A74DF73AB4F1/144053/037ET033650037.pdf
- [3] ERTMS para *dummies*. Última consulta 2/6/2022. Disponible en <https://www.geotren.es/blog/ertms-para-dummies/>
- [4] “El sistema de seguridad de la línea del AVE Valladolid-León condicionará su velocidad en los primeros meses”. Noticia publicada en El Norte de Castilla, el 11 de marzo de 2015. Disponible en: <https://bit.ly/3OX3vVb> [último acceso: 23/04/2022].
- [5] Sistema de control ferroviario europeo. Última consulta 2/6/2022. Disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control_ferroviano_europeo
- [6] Subsystems and Constituents of the ERTMS. Última consulta 2/6/2022. Disponible en: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/how-does-it-work/subsystems-and-constituents-ertms_en
- [7] RBC (Radio Block Centre). Última consulta 2/6/2022. Disponible en: <https://www.admaioem.com/rbc-radio-block-centre-zone-controller/>

- [8] Gregorio Zarcero Muñoz. Experiencias en la construcción de redes GSM-R en las líneas de alta velocidad de ADIF. *Revista BIT del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación*. Número 157. Junio-julio 2006. Páginas 53-55.
- [9] Luis García Tassias. Telecomunicaciones ferroviarias en las líneas de alta velocidad. *Revista BIT del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación*. Número 157. Junio-julio 2006. Páginas 34-39.
- [10] *GSM Handover*, última consulta 25/04/2022. disponible en:
<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/2g-gsm/handover-handoff.php>.
- [11] GNSS for train control systems, Ansaldo STS, Última consulta 2/6/2022.
Disponible en:
https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/APPAP_Workshop_Ansaldo_0.pdf
- [12] *E carrier system*, última consulta 25/04/2022. Disponible en
<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/e-t-carrier-e1-t1/e-carrier-line-basics.php>.
- [13] Trevor S. Bird, “Definition and Misuse of Return Loss”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. Vol. 51, Issue 2, pp.166-167, April 2009.
- [14] “Time-Domain Reflectometry”. *ScienceDirect*. Última consulta: 4/07/2022.
Disponible en: <https://bit.ly/3yT2PL6>
- [15] Recomendación UIT-R P.525-4 (8/2019). Última consulta 2/6/2022. Disponible en
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-I!!PDF-S.pdf
- [16] Especificación técnica de interoperabilidad relativa a la seguridad en los túneles ferroviarios del sistema ferroviario de la Unión Europea. Última consulta 2/6/2022.
Disponible en <https://www.boe.es/doue/2014/356/L00394-00420.pdf>
- [17] Especificación CPR del cable coaxial superflexible. Última consulta 8/6/2022. Disponible en <https://www.rfsworld.com/userfiles/cpr/rfs-products-cpr-compliance.pdf>