

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

*“Aplicación de un sistema de radiotelefonía GSM-R
a una línea de Alta Velocidad Ferroviaria”*

Ana Moyano Llamazares

Julio 2010

***“Aplicación de un sistema de radiotelefonía GSM-R
a una línea de Alta Velocidad Ferroviaria”***

AUTOR: Ana Moyano Llamazares

TUTOR: Santiago Cobo Diego (Adif)

PONENTE: Jorge Ruiz Cruz

Dpto. de Ingeniería Informática

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio de 2010

AGRADECIMIENTOS

Tras mucho trabajo, muchas dudas y muchos cabezazos contra la pared aquí estoy, escribiendo los agradecimientos. ¡Creía que nunca llegaría!

Quería agradecer en general a todas las personas que me han acompañado, ayudado y hasta, a veces, martirizado en este recorrido que ha durado tantos años, pero que finalmente parece que llega a su fin. Gracias a todos los profesores y compañeros que he tenido en estos cursos.

Muchas gracias también a mi ponente, Jorge Ruiz Cruz, porque las veces que le he necesitado ha respondido rápidamente a mis necesidades.

A mi tutor, Santiago Cobo, por ofrecerme la posibilidad de desarrollar un Proyecto Final de Carrera fuera de la Universidad, con una clara aplicación práctica y ante todo, útil.

A Rafael Gutiérrez por su amabilidad, por la cantidad de horas que me ha dedicado y sobre todo por su enooooorme paciencia. Y también por su capacidad para hacerme ver un granito de arena donde yo veía tremendas montañas.

A mis padres y a mi hermana por soportarme cuando no me soportaba ni yo.

Y de un modo particular quiero agradecer a algunos compañeros con los que he tenido más trato a lo largo de tantos años, con los que he pasado alegrías y penas, con los que me he caído y con los que me he levantado. Muchas han sido las horas de estrés compartidas, pero también muchas las risas en la cafetería, entre clases, y también en los laboratorios... cuando ya, a veces, te reías pero por no llorar... ¡Qué momentos! Creo que justamente esos últimos no los echaré de menos. Jaja.

Elena, Mónica, Esther (en el bando de las chicas), Neta, Nico, Imanol, Nacho, Sergio, Marcos, Juanjo... (A más de uno me dejo seguro): Gracias por amenizar mis días en la Escuela. No sabemos dónde estaremos mañana cada uno de nosotros, pero ojalá nos sigamos recordando y sigamos juntos por muchos años. Y si no nos vemos... pues oye, tirad de las telecomunicaciones, que para eso es nuestra profesión!! Jeje.

Quiero dedicar este Proyecto muy especialmente a Guido Tomás, un amigo muy querido, quien a día de hoy debería estar como nosotros, terminando, pero que por desgracia no pudo ver este día.

Y a mí misma, ¿Por qué no? Soy la que más se lo merece. ¡Que mi trabajo me ha costado llegar hasta aquí!

GRACIAS.

RESUMEN

En el presente proyecto se diseña una red GSM-R con el objeto de dar cobertura a una línea de alta velocidad ferroviaria. Se instalará un sistema basado en el estándar GSM-R definido por EIRENE - MORANE para transmisiones de voz y datos, que asegure la comunicación hasta los 500 Km/h. Concretamente se dará cobertura a una hipotética línea que conectará las ciudades de Madrid y Ávila, con un trazado de unos 90 kilómetros de longitud aproximadamente.

Inicialmente se recogen las principales características de dicho estándar, describiendo cada subsistema y cada elemento implicado. Se determinará la ubicación exacta de las estaciones base, así como de los repetidores necesarios en el interior de túneles para asegurar los niveles mínimos de cobertura fijados por ADIF. Estos niveles son más restrictivos que los exigidos por EIRENE. Se diseña por lo tanto el plan de cobertura y a continuación el plan de frecuencias a aplicar para la línea.

Posteriormente se realiza un estudio de tráfico para determinar los transmisores activos necesarios por cada estación base y se analiza qué tipo de consumidores existen en la red GSM-R y a partir de qué red de las dos existentes serán alimentados.

Para finalizar, se adjuntan unos planos y fotografías que pretenden clarificar los puntos anteriores.

ABSTRACT

The aim of this project is to design a GSM-R network to offer coverage to a high speed train line. A system for voice and data transmission based on the GSM-R standard will be installed. The standard was defined in the EIRENE-MORANE project and must cover trains travelling at speeds up to 500 Km/h. Coverage will be served for an hypothetical line between Madrid and Ávila, with a trace about 90 Km long.

Firstly, the main characteristics of this standard are summarized, describing each subsystem and element of the GSM-R network. The exact ubication of the base station is determined, and so for the repeaters, needed inside the tunnels to assure the coverage levels required by ADIF, wich are more restrictive than the ones settled by EIRENE. The coverage and the frequencies assignament plannig is therefore defined.

Then the traffic will be analyzed in order to determine the number of active transmissors per base station. The following step would be to examine the type of energy needed for each equipment supported by the network and wether to supply this energy from the catenary or from the 750V network.

Finally, some designs and photographs are enclosed to clarify the main points of the system.

Índice de contenidos

Índice de figuras	8
Índice de tablas.....	9

➤ MEMORIA DESCRIPTIVA

Capítulo 1 – Introducción	11
1.1 Introducción	13
1.2 Motivación e Historia	13
1.3 Antecedentes.....	14
1.4 Objetivos	14
1.5 Documentos que integran el proyecto	15
Capítulo 2 – Estructura general del sistema GSM-R.....	19
2.1 Organización general del sistema GSM-R.....	21
2.2 Funcionalidades del sistema GSM-R.....	23
2.3 Solución adoptada.....	24
2.3.1 Requisitos generales.....	24
2.3.2 Descripción de equipos y elementos del sistema.....	25
2.3.3 Elementos de red.....	27
2.3.4 Topología de red.....	28
2.4 Calidad de servicio.....	29
2.4.1 Definiciones.....	30
2.4.2 Prestaciones del sistema.....	31
2.5 Servicios.....	34
2.5.1 Servicio de voz.....	34
2.5.2 Servicio de datos.....	35
Capítulo 3 – Cobertura radioeléctrica.....	37
3.1 Codificación de emplazamientos.....	39
3.2 Consideraciones generales.....	40
3.3 Metodología y criterios de planificación.....	43
3.3.1 Metodología	43
3.3.2 Criterios	44
3.4 Diseño de celdas.....	45
3.4.1 Concepto de celda compuesta.....	45
3.4.2 Handover.....	45
3.5 Configuración Estación Base.....	47
3.5.1 Estación Base.....	47
3.5.2 Sistema radiante.....	47
3.6 Balance enlace Estación Base.....	49
3.6.1 Resultados de la planificación radioeléctrica.....	54
3.7 Cobertura en túneles.....	55
3.7.1 Limitaciones impuestas por el sistema.....	55
3.7.2 Ventajas e Inconvenientes.....	60
3.7.3 Configuración del equipamiento en túneles.....	60
3.8 Solución final.....	62

Capítulo 4 – Plan de frecuencias.....	63
4.1 Espectro de frecuencias.....	65
4.2 Criterios de planificación de frecuencias.....	67
4.2.1 Requerimientos de calidad de servicio.....	67
4.3 Patrón de frecuencias.....	70
4.3.1 Plan para estaciones.....	71
4.4 Lista de celdas vecinas.....	72
Capítulo 5 – Estudio de tráfico.....	73
5.1 Modelo de tráfico.....	75
5.1.1 Probabilidad de bloqueo.....	75
5.1.2 Clasificación del tráfico.....	76
5.1.3 Caracterización del tráfico.....	77
5.2 Estimación del tráfico.....	77
5.2.1 Tráfico en una celda tipo.....	78
5.2.2 Tráfico en una celda urbana.....	79
5.3 Dimensionamiento del subsistema radio.....	81
5.3.1 Dimensionamiento de la interfaz aire (Um).....	81
5.3.2 Dimensionamiento de la interfaz Abis (BTS-BSC).....	82
5.3.3 Dimensionamiento de la interfaz Asub (BSC-TRAU).....	83
5.3.4 Dimensionamiento de la interfaz A (BSC-MSC).....	84
5.3.5 Controladora de estaciones base, BSC.....	85
5.3.6 Unidad de transcodificación y adaptación de velocidades. TRAU.....	85
Capítulo 6 – Sistema de transmisión.....	87
6.1 Breve introducción.....	89
6.2 Descripción de la red de telecomunicaciones fija.....	91
6.2.1 Red de acceso a BTS.....	91
6.2.2 Red de acceso a repetidores.....	94
6.2.3 Red de acceso sistema de supervisión.....	94
Capítulo 7 – Suministro de energía.....	95
7.1 Redes y tipos de consumidores.....	97
7.2 Cuadro eléctrico GSM-R y componentes.....	99
7.2.1 Estabilizador y filtro.....	100
7.2.2 Armario de rectificadores.....	100
7.2.3 Inversor GSM-R.....	100
7.2.4 Acometidas a repetidores.....	100
7.3 Protección de personas contra contactos.....	102
Capítulo 8 – Conclusiones y trabajo futuro.....	103
8.1 Conclusiones y trabajo futuro.....	105

➤	REFERENCIAS	107
➤	APÉNDICES	111
	Apéndice A: Lista de acrónimos	113
	Apéndice B: Erlang B.....	115
➤	PLANOS	119
	Trazado de la Línea Alta Velocidad Madrid – Ávila.....	121
	Ubicación de las BTS en la Línea.....	122
	Cuadro eléctrico en caseta GSM-R.....	123
	Diagramas de radiación de las antenas para GSM-R.....	124
➤	FOTOS	125
➤	PRESUPUESTO	131
➤	PLIEGO DE CONDICIONES	137

Índice de figuras

- Figura 1: Objetivo de la red EIRENE.
- Figura 2: Esquema de la arquitectura del sistema GSM-R.
- Figura 3: Estructura general del sistema GSM-R.
- Figura 4: Esquema funcionamiento de la TRAU.
- Figura 5: Topología. Configuración en anillo.
- Figura 6: Distancia de solapamiento.
- Figura 7: Distancia de solape en función de la velocidad.
- Figura 8: Celda compuesta.
- Figura 9: Posibles handovers según los elementos de la red entre los que se produzca el traspaso.
- Figura 10: Balance descompensado.
- Figura 11: Estructura de dos de los tipos de ráfagas de transmisión.
- Figura 12: Ejemplo temporal de la llegada de varias ráfagas.
- Figura 13: Gráficas representativas de la planificación de cobertura en túneles.
- Figura 14: Distancia máxima nominal entre BTS y FOR.
- Figura 15: Distancia máxima nominal entre FOR y FOR.
- Figura 16: Solución final planificada.
- Figura 17: Representación gráfica de la banda de frecuencias reservadas para GSM-R
- Figura 18: Numeración de canales para la banda de GSM-R
- Figura 19: Representación de las 19 portadoras en las dos sub-bandas.
- Figura 20: Interferencia cocal máxima admisible.
- Figura 21: Interferencia canal adyacente máxima admisible.
- Figura 22: Esquema repetición de frecuencias.
- Figura 23: Estructura Trama STM-1. Son dos tramas STM-1 seguidas.
- Figura 24: recorrido en bucle del enlace E1 principal entre las BTS's q comparten un enlace.
- Figura 25: recorrido en bucle del enlace E1 redundante entre las BTS's q comparten un enlace
- Figura 26: ejemplo de asignación de time slots en la interfaz Abis, dimensionado para BTS's de hasta 4 transmisores
- Figura 27: Eurobaliza
- Figura 28: Esquema ECTS nivel 2.

Índice de tablas

- Tabla 1: Funcionalidades sistema GSM-R.
- Tabla 2: Tabla de prestaciones del sistema GSMR-R.
- Tabla 3: Servicios de voz según el tipo de terminal. Fuente: EIRENE.
- Tabla 4: Servicios de datos según el tipo de terminal. Fuente: EIRENE.
- Tabla 5: Caracterización de una BTS para el balance de enlace BTS.
- Tabla 6: Caracterización del terminal para el balance de enlace BTS.
- Tabla 7: Cálculo balance, enlace descendente.
- Tabla 8: Cálculo balance, enlace ascendente.
- Tabla 9: Tabla planificación BTS.
- Tabla 10: Caracterización de una BTS en boca de túnel.
- Tabla 11: Caracterización de una Repetidor en túnel.
- Tabla 12: Patrón reutilización de frecuencias.
- Tabla 13: Plan de frecuencias para las BTS's.
- Tabla 14: Lista de vecindades.
- Tabla 15: Probabilidades de bloqueo según interfaz recomendadas por Eirene – Morane.
- Tabla 16: Tráfico en una celda tipo.
- Tabla 17: Tráfico en una celda en medio urbano.
- Tabla 18: Relación transmisores activos, tráfico y canales de tráfico.
- Tabla 19: Anillos lógicos planificados. Interfaz Abis.
- Tabla 20: Dimensionamiento interfaz Asub.
- Tabla 21: Dimensionamiento interfaz A.
- Tabla 22: Tabla de repetidores con su ubicación y distancia a BTS.
- Tabla 23: Secciones de cables calculadas para los repetidores.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

1.2 Motivación e Historia

1.3 Antecedentes

1.4 Objetivos

1.5 Documentos que integran el proyecto

El sistema GSM es un estándar para comunicaciones móviles surgido a partir de la necesidad de unificación de los diferentes sistemas que estaban siendo utilizados en diferentes países, de modo que se permitiera la interoperabilidad de las distintas redes de comunicaciones. Para elaborar este estándar se formó un grupo especial (Groupe Spéciale Mobile, GSM) cuya fundamental decisión fue reservar una banda de frecuencias común para la red. La banda originalmente reservada consta de dos sub-bandas de 25 MHz cada una: 890-915 MHz y 935-960 MHz.

El sistema GSM-R se basa en este estándar, concretamente en su fase 2+. GSM-R es un estándar desarrollado específicamente para comunicación de voz + datos y aplicaciones ferroviarias. Se necesita garantizar el funcionamiento del sistema aún cuando los terminales viajan a velocidades muy superiores a las habituales (hasta los 500 Km/h). Los principales efectos de la velocidad a la que circulan los trenes son una mayor distorsión de las señales de radio y la disponibilidad de un tiempo menor para realizar los trasposos.

GSM-R opera en un rango de frecuencias diferente a GSM para asegurar la inexistencia de interferencias intrabanda con las redes GSM públicas. GSM-R está destinado a sustituir las diferentes redes de comunicación ferroviaria existentes anteriormente, que normalmente son sistemas analógicos con limitaciones en cuanto a interoperabilidad y prestación de servicios.

Desde los primeros días de la comunicación por ferrocarril, cada operador nacional de ferrocarriles ha tenido al menos un sistema de comunicaciones de radio propietario, principalmente en las bandas de frecuencia de 440 a 470 MHz, pero con multitud de tipos diferentes de modulaciones, códigos y señalizaciones. Debido a la proliferación de líneas ferroviarias de alta velocidad en toda Europa y puesto que los trenes cada vez cruzaban más fronteras durante sus trayectos, fue apareciendo la necesidad de crear un único sistema europeo de radiocomunicaciones.

En 1993, la organización mundial de cooperación en ferrocarriles (UIC, Union Internationale des Chemins de fer) decidió un nuevo sistema de comunicaciones para ferrocarriles. La decisión que se tomó utilizaba la tecnología GSM 900 ligeramente modificada. Treinta y dos operadores de ferrocarriles, pertenecientes a veinticuatro países europeos, acordaron en la EIRENE (European Integrated Railway radio Enhanced Network) desarrollar la tecnología de red GSM-R. Es específica para los ferrocarriles (-R proviene de Railway, ferrocarril). Ésta acabó de ser especificada en 1999 por el ETSI (European Telecommunications Standards Institute, Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones) y en 2000 por EIRENE.

*Actualmente GSM es acrónimo de las palabras inglesas: Global System for Mobile Communication (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles).

Anteriormente a la aparición de GSM-R (sistema digital), se diseñó un sistema analógico cuya función era asegurar una comunicación permanente entre los trenes y el puesto de mando, de modo que repercutía directamente en una mayor seguridad en la circulación. Este sistema se conoce con el nombre de Tren-Tierra. Es un sistema de radiotelefonía cuya implantación se inició en 1982, pero no fue hasta 1984 cuando comenzó su operatividad, en el tramo Oviedo-Ujo, de la línea León-Gijón.

El Tren-Tierra está formado por tres elementos: una red fija, los equipos a bordo y los puestos centrales de radio. El intercambio de información se efectúa entre el puesto central y los puestos fijos a través de cable, y desde el puesto fijo y los móviles mediante una conexión radio en UHF. Es un sistema analógico monocanal, que opera en la banda UHF de los 450 MHz. No es compatible con otros sistemas europeos, ni éstos entre sí, de modo que surgió la necesidad de un sistema que permitiera la interoperabilidad entre redes de ámbito internacional.

En la Administración Ferroviaria Española actualmente hay 7.363 kilómetros de red ferroviaria dotados de este sistema, que paulatinamente será sustituido por sistemas digitales. De modo que el desarrollo del Tren-Tierra llegó a su punto final: ha demostrado ser un sistema robusto y eficaz, pero con importantes limitaciones sobre todo desde el punto de vista tecnológico, de cara a las nuevas necesidades de la explotación ferroviaria.

Para mayor información sobre este sistema: Referencias [10], [11] y [12]

Con este proyecto se pretende dar solución a una hipotética línea de alta velocidad que enlazaría las ciudades de Madrid y Ávila. Esta línea tendría una trayectoria sensiblemente paralela a la línea tradicional.

El objetivo del presente proyecto es aplicar el estándar GSM-R definido en el proyecto EIRENE/MORANE a la citada línea, calculando las estaciones base, repetidores, antenas y demás elementos y sistemas necesarios, especificando su ubicación, su función, etc. Se pretende por lo tanto diseñar el sistema adecuado con la suficiente definición para posibilitar su implantación y puesta en marcha.

El proyecto desarrolla una solución de altas prestaciones cuya finalidad es la siguiente:

- Implementar un sistema de comunicaciones móviles, basado en el sistema GSM-R que, entre otras funcionalidades, garantice las comunicaciones de una forma fiable.
- Ofrecer una cobertura que garantice los niveles de potencia exigidos mayor que el 95% (tanto en tiempo como en espacio) en toda la línea.
- Ofrecer una arquitectura que garantice una fiabilidad y disponibilidad avanzadas.
- Implantar sistemas que cumplan los estándares internacionales e interfaces abiertas permitiendo el uso de equipos de otros suministradores a la red GSM-R.
- Implantar un sistema de gestión sencillo de manejar.

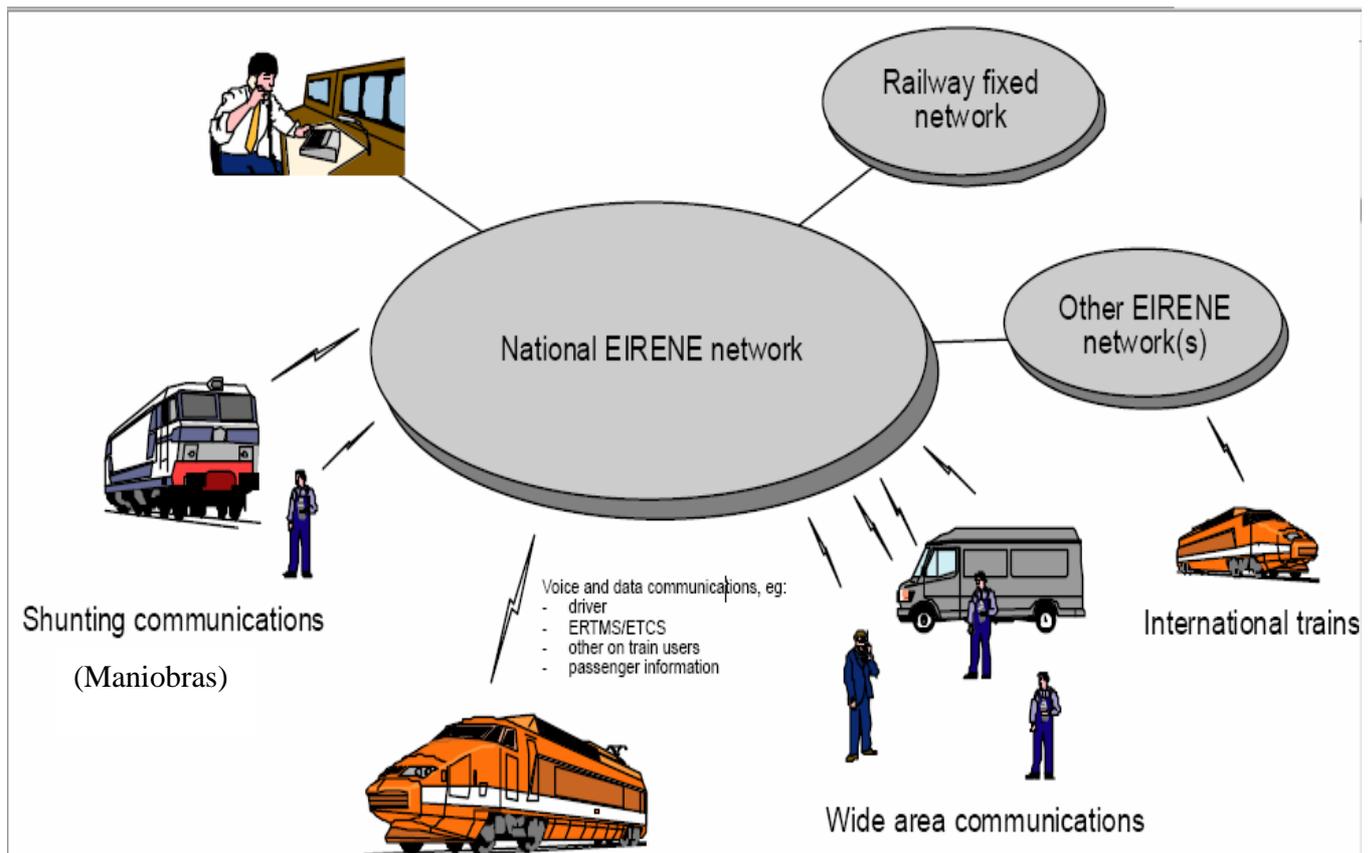


Fig.1: Objetivo de la red EIRENE. [fuente: EIRENE]

El trabajo llevado a cabo para la elaboración de este proyecto consistirá exactamente en:

- Establecer la trayectoria de la nueva línea con la ayuda del programa Google Earth, teniendo en cuenta la orografía del trazado, la necesidad de establecer túneles donde existan accidentes geográficos importantes, y con las consideraciones generales que debe cumplir una línea de alta velocidad (radio de curvatura > 5000 metros y pendientes < 3%).
- Estudio de las características principales del estándar GSM-R, y elaboración de una síntesis de su arquitectura y funcionalidades. (Capítulo 2)
- Determinar la ubicación exacta de cada estación base y de cada repetidor para lograr los requerimientos de cobertura exigidos por EIRENE. Estudio del balance de enlace. Definición del sistema de cobertura en túneles como caso particular.
- A continuación, en el capítulo 4, se procede a la asignación de frecuencias a cada celda y el establecimiento de su lista de vecindad.
- Se realizará un estudio de tráfico para determinar el número de transmisores que serán necesarios por BTS (configuración de la BTS) para poder cursar todo el tráfico generado.
- Se establecerán los anillos tanto físicos como lógicos utilizados para la red de acceso.
- En el capítulo 7 se especificarán las fuentes de energía disponibles y se hará una evaluación de qué tipo de consumidores existen y cómo serán alimentados.
- Finalmente se procederá a la elaboración de ciertos planos y la estimación de un presupuesto para la implantación de dicho sistema.

1.4 Documentos que integran el proyecto

La estructura del proyecto es la siguiente:

1) MEMORIA DESCRIPTIVA

En este documento se especifican los factores de carácter general de este sistema GSM-R, las características de las instalaciones proyectadas, así como la justificación de la solución adoptada en sus aspectos técnicos.

Consta de los siguientes capítulos:

Capítulo 1 – Introducción

Capítulo 2 – Arquitectura y Servicios del sistema GSM-R

Capítulo 3 – Cobertura radioeléctrica

Capítulo 4 – Plan de frecuencias

Capítulo 5 – Estudio de tráfico

Capítulo 6 – Sistema de transmisión

Capítulo 7 – Suministro de energía

2) PLANOS

En este apartado se incluirán algunos planos como el trazado de la hipotética línea de alta velocidad Madrid-Ávila, la ubicación de los emplazamientos de las BTS's y túneles, el cuadro eléctrico de alimentación de la caseta GSM-R así como un plano de emplazamiento tipo.

3) PRESUPUESTOS

Recogerá el cuadro de precios a aplicar, así como un presupuesto parcial y una estimación del presupuesto global.

4) PLIEGO DE CONDICIONES

CAPÍTULO 2:

ARQUITECTURA Y SERVICIOS

DEL SISTEMA GSM-R

2.1 ORGANIZACIÓN GENERAL DEL SISTEMA GSM-R

2.2 FUNCIONALIDADES DEL SISTEMA GSM-R

2.3 SOLUCIÓN ADOPTADA

2.3.1 REQUISITOS GENERALES

2.3.2 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.3.3 ELEMENTOS DE RED

2.3.4 TOPOLOGÍA DE LA RED

2.4 CALIDAD DE SERVICIO

2.4.1 DEFINICIONES

2.4.2 PRESTACIONES DEL SISTEMA

2.5 SERVICIOS DEL SISTEMA GSM-R

2.5.1 SERVICIOS DE VOZ

2.5.2 SERVICIOS DE DATOS

CAPÍTULO 2: ARQUITECTURA Y SERVICIOS DEL SISTEMA GSM-R

Tras el estudio de varios de los libros y documentos detallados en la bibliografía se procederá a exponer cada uno de los subsistemas que conforman el sistema GSM-R, así como cada uno de los componentes y elementos de los que constan, explicando sus funciones, su ubicación y demás datos de interés. Posteriormente se procede a explicar los servicios del sistema. Más concretamente para la redacción de este capítulo se emplea sobre todo la información contenida en las referencias [1] y [2] y en todas las especificaciones de EIRENE/MORANE, referencias [14], [15] y [16].

2.1 Organización general del sistema GSM R

El sistema GSM-R seguirá básicamente la arquitectura definida para un sistema GSM tradicional, establecida por los documentos de aplicación del ETSI. Sobre esta base, se añadirán diferentes módulos y dispositivos que darán al sistema las funcionalidades necesarias para cubrir los servicios demandados por las líneas ferroviarias.

A continuación se presenta un esquema que sintetiza la estructura de modo gráfico:

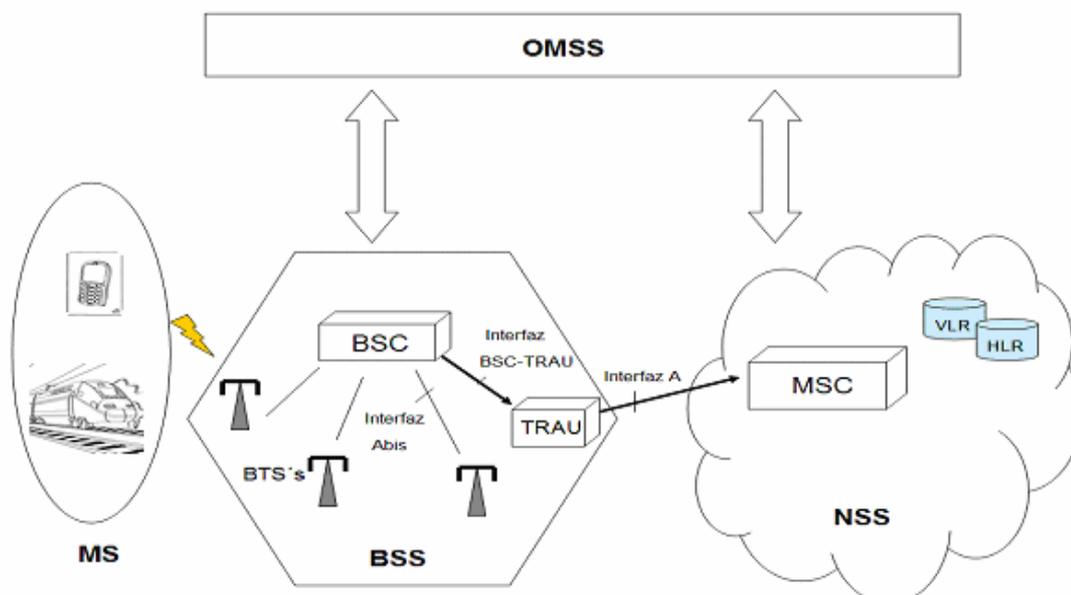


Fig.2: Esquema de la arquitectura del sistema GSM-R.

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

- MS (Subsistema de estaciones móviles): Existen estaciones móviles de varios tipos.
- BSS (Subsistema de estaciones base): Esta formado por las BTS's (estaciones base), las BSC's (controlador de estaciones base), la TRAU (unidad de transcodificación y adaptadora de la velocidad). Todos estos elementos serán explicados en profundidad más adelante.
- NSS (Subsistema de red y conmutación): Es la parte de red destinada a conmutar las llamadas a través de las centrales MSC. Incluye, además, las bases de datos que permiten el establecimiento de las mismas (HLR, VLR). También es el nexo de unión de la red GSM-R con otras redes externas, tanto fijas como móviles.
- OMSS (Subsistema de operación y mantenimiento): Se encargará de todas las tareas de operación y mantenimiento de la red.

La interfaz entre BSC y MSC se denomina interfaz A. La interfaz entre las BTS's y la BSC se denomina interfaz A-bis y la interfaz entre la BSC y la TRAU (o TCU) se denomina Asub.

Aquí se presenta otro esquema más detallado del sistema GSM-R:

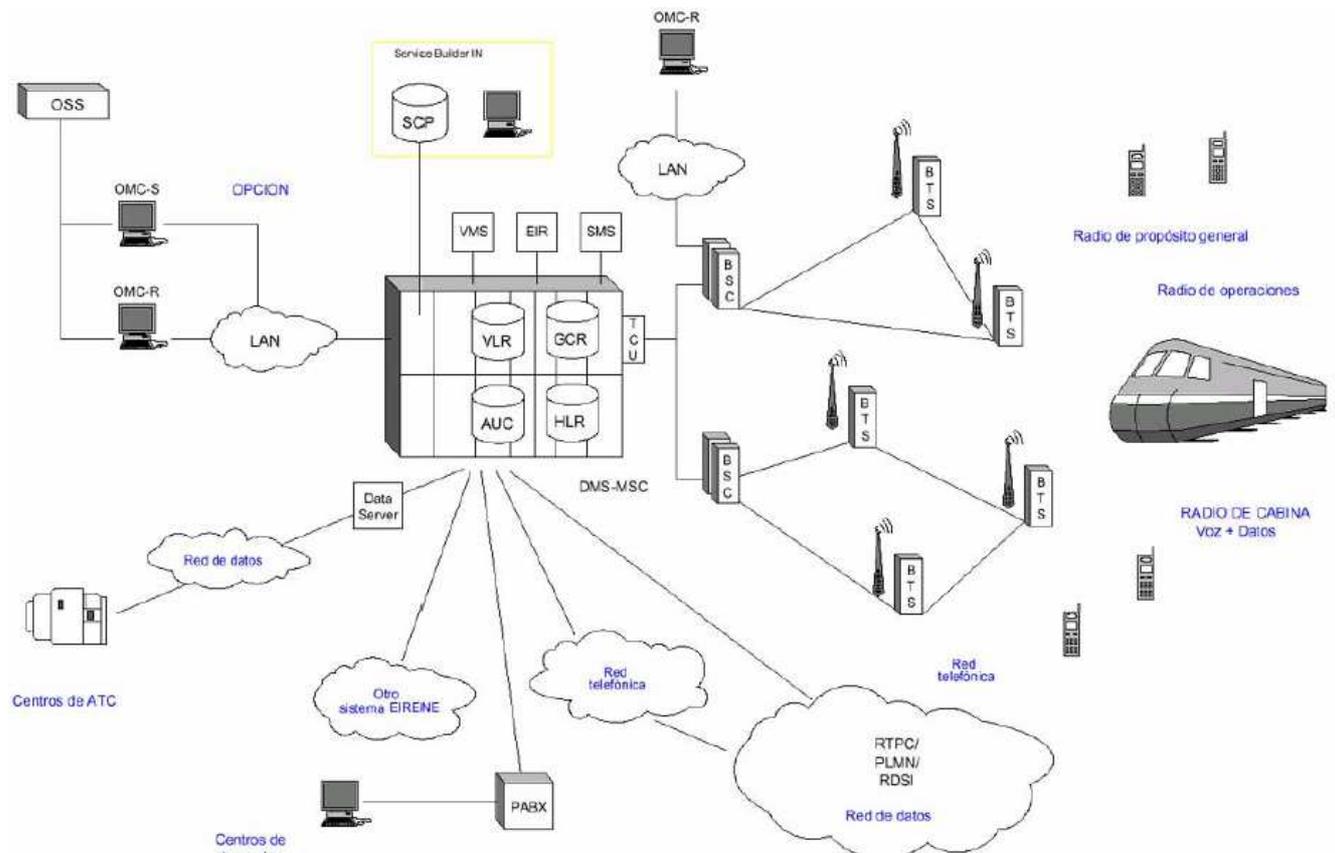


Fig. 3: Estructura general del sistema GSM-R [33]

2.2 Funcionalidades del sistema GSM-R

El sistema GSM-R a instalar deberá soportar las siguientes funcionalidades:

Aplicaciones ferroviarias	Comunicación entre controlador y maquinista Control de trenes Maniobras Mantenimiento de vías Comunicaciones ferroviarias auxiliares Comunicaciones locales en estaciones Comunicaciones de larga distancia Aplicaciones ferroviarias Servicios para pasajeros Base para ERMTS
Operación ferroviaria	Numeración funcional Filtrado por matriz de accesos Numeración posicional Aspectos de operación ferroviaria Llamadas de alta prioridad
Servicios de telecomunicación ASCI*	eMLPP * Llamadas de grupo Llamadas de difusión Llamadas de emergencia

Tabla 1: Funcionalidades sistema GSM-R [Fuente: EIRENE]

* ASCI: Advanced Speech Call Items

* eMLPP: enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption service (servicio mejorado de precedencia y prioridad multinivel) - Llamadas prioritarias -

2.3.1. REQUISITOS GENERALES

Para diseñar el sistema GSM-R para esta línea se han tenido en cuenta una serie de requisitos generales que se deberán cumplir, impuestos por EIRENE / MORANE y por el gestor nacional.

Desde un punto de vista operacional existen los siguientes condicionantes:

- Los niveles de operación y servicio que ofrecerá la red serán totalmente independientes de la línea y de la topología del trazado.
- El sistema se integrará perfectamente con el resto de la infraestructura ya existente.
- Se asegurará la compatibilidad de los sistemas GSM-R instalados, tanto con la red nacional como con las redes europeas.
- La integración de la red se realizará de tal forma que los cambios en la parte hardware del sistema ya existente sean los mínimos posibles. Las principales actuaciones en este caso serán actualizaciones del software de los equipos.

Además, la interfaz radio cumplirá los siguientes requisitos generales:

- Permitirá compatibilidad de terminales móviles. De esta forma, los terminales de diferentes fabricantes operarán correctamente con la red fija.
- Los terminales cubrirán las bandas delimitadas para los servicios GSM, por lo que también serán compatibles con las redes de los operadores públicos.
- Se diseñará la red dentro del ancho de banda GSM-R, asegurando una cobertura suficiente para prestar los servicios requeridos.
- Se tendrán en cuenta los parámetros relevantes del sistema (codificación, corrección de errores, etc.) para alcanzar la mayor resistencia a las interferencias posible.
- Los parámetros significativos de acceso múltiple al medio radioeléctrico, (división en tiempo TDMA- y en frecuencia –FDMA-), así como los mecanismos de modulación, seguirán lo especificado en las recomendaciones para el estándar GSM.
- Se garantizará la operatividad y el correcto rendimiento del sistema a velocidades de 350 Km/h, y hasta 500 Km/h, tal y como exige EIRENE / MORANE
- La solución técnica que se instalará cumplirá todos los objetivos especificados por EIRENE y MORANE para el sistema GSM-R.

2.3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y ELEMENTOS DEL SISTEMA GSM-R

➤ BTS: Estación base transceptora

Las BTS's posibilitan la interfaz radio entre la red GSM-R y las estaciones móviles y cubren todo el área de servicio. Pueden estar compuestas por una o varias celdas. Una estación base podrá tener una configuración de 1, 2, 3 o hasta 4 transmisores activos y siempre con uno redundante (de reserva, en stand-by) por celda. Para la implantación de la red GSM-R se empleará un tipo de estación base que pueda configurarse con un máximo de ocho portadoras. Éstas, por lo general, se encontrarán configuradas por defecto con un transmisor activo y con otro de reserva, en 'standby', lo que supone una configuración 1+1, excepto en aquellas estaciones base en las que el estudio de tráfico determine la utilización de más transmisores, lo que supondrá una configuración n+1, siendo n el número de transmisores activos.

Estas BTS's operan en las bandas de frecuencias del sistema GSM-R. La frecuencia de operación se determinará después de realizar un plan de frecuencias. Incorporarán algoritmos especiales de ecualización que permitan mantener la comunicación a unos buenos niveles de calidad, incluso cuando los terminales se desplazan a cierta velocidad (hasta 500 Km/h), aunque en la práctica la velocidad máxima a la que circulará el tren será de 350 Km/h.

Las BTS's serán modulares de modo que se facilite la expansión de la red, o la sustitución de elementos en caso de avería y dispondrán de unos combinadotes para combinar en un mismo camino las señales de transmisión y de recepción para alimentar una única antena doble.

➤ Repetidores

Los repetidores serán de tipo ópticos y de canal selectivo. Estos elementos proporcionan la interfaz radio entre la red GSM-R y las estaciones móviles y dan cobertura al área de servicio no cubierto por las BTS's (generalmente túneles o zonas de trinchera).

Los repetidores operarán en las bandas de frecuencias del sistema GSM-R. Las frecuencias de operación serán las mismas que la estación base a la que estén conectados. Cada repetidor tendrá asociado su unidad maestra repetidora (BMU) y su estación base. El equipo repetidor óptico recibirá la señal óptica de la unidad maestra repetidora y la convertirá en señal RF con un nivel adecuado para transmitirla hasta las antenas. Estos repetidores deberán ser bidireccionales.

➤ **BMU: Unidad Maestra Repetidora**

El sistema de repetidores incluirá Unidades Maestras Repetidoras (BMU). La BMU es el equipo conectado y ubicado en la estación base, utilizado para convertir la señal RF de ésta en señal óptica y transmitirla por el sistema de distribución de fibra óptica. La BMU deberá tener capacidad para distribuir la señal de la estación base hasta los repetidores. Además deberá ser capaz de generar alarmas de fallo de cada uno de los repetidores que tenga conectado así como las suyas internas.

➤ **BSC: Controlador de Estaciones Base**

La unidad controladora de estaciones base (BSC), es la parte inteligente del BSS. Se encarga de manejar las funciones de control más importantes. La BSC será modular y deberá existir la posibilidad de realizar las actualizaciones pertinentes sobre ella cuando se consideren necesarias sin pérdida del servicio. En sus bases de datos se configuran parámetros como la velocidad de transmisión, las frecuencias, las listas de vecindad...

La BSC realizará las siguientes funciones de procesamiento de radio:

- Administración de recursos de radio.
- Administración de canales de radio.
- Administración de las conexiones locales.
- Funciones de seguridad.

➤ **TRAU: Unidad Transcodificadora y Adaptadora de Velocidad de Transmisión.**

La TRAU o TCU tiene la función de adaptar las diferentes velocidades de transmisión entre la BSC y la MSC según la norma de GSM. Los canales de voz y datos de 16 Kbps de la red radio se adaptan y recodifican a la red normalizada de 64 Kbps del subsistema de conmutación NSS.

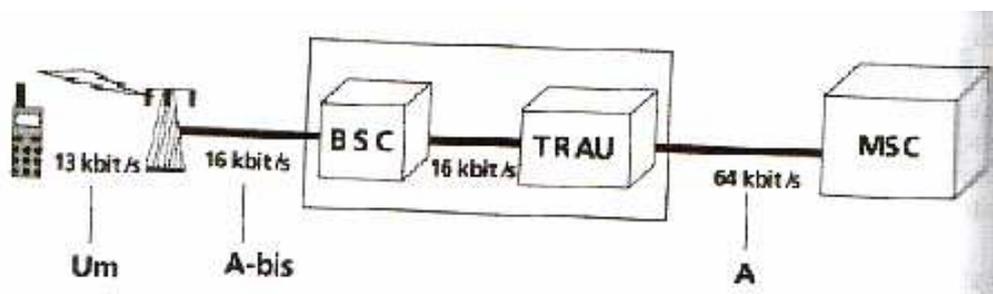


Fig 4: Esquema funcionamiento de la TRAU. [1]

➤ **MSC: Central de conmutación de móviles**

La MSC se encarga del control y enrutamiento de las llamadas.

La MSC conmuta las conexiones de radio entre:

- Una estación móvil GSM-R y un terminal de red fija.
- Una estación móvil GSM-R y otra estación móvil PLMN (red pública)
- Dos estaciones móviles dentro de la plataforma GSM-R

Por otra parte el sistema GSM-R se apoyará en la IN (Intelligent Network, Red Inteligente) existente para realizar todas aquellas funciones exigibles a una red GSM-R. Además, esta red inteligente soportará los siguientes servicios: direccionamiento funcional y direccionamiento basado en posición.

➤ **MS: Estaciones móviles**

Entre los terminales se pueden distinguir cuatro tipos:

- Radio en cabina (Cab Radio): embarcada en los trenes.
- Portátil de propósito general: para uso del personal de la línea ferroviaria.
- Portátil de operación y mantenimiento: para uso del personal encargado de las operaciones de mantenimiento de la vía o maniobras.
- Portátil modo ingeniería: para personal realizando operaciones de mantenimiento de la red GSM-R

2.3.3. ELEMENTOS DE RED

➤ **Subsistema radio**

Se instalarán tantas BTS's y repetidores como se especifique posteriormente en el capítulo 3 (Cobertura radiolétrica), a lo largo de toda la Línea. Éstos proporcionarán la cobertura radioeléctrica necesaria para el correcto funcionamiento de los servicios. Como ya se ha mencionado con anterioridad, las estaciones base se equiparán con tantos transmisores activos como sea necesario, y siempre contarán con un transmisor de reserva, en stand-by, dotando así de redundancia a la BTS en caso de fallo de un transmisor. La BSC y TRAU estarán instaladas en el puesto de mando del gestor ferroviario, donde se encuentra ubicada la MSC (central de conmutación).

Las BSC's y TRAU's estarán dimensionadas para soportar todos los canales y servicios a implementar en nuestra red y estarán equipadas de acuerdo a las necesidades de tráfico, según se especifica en el capítulo 5 (Estudio de tráfico). Ambos equipos (BSC y TRAU) estarán

conectados al sistema de alimentación ininterrumpida existente, para asegurar su funcionamiento en caso de fallo en el sistema de alimentación principal, como se verá en el Capítulo 7.

La conexión entre las BSC's y las BTS's se realizará mediante el sistema de comunicaciones fijas SDH, creando anillos de hasta 4 BTS's para las interfaces Abis, según se explica en el Capítulo 6.

➤ **Centro de conmutación**

El centro de conmutación MSC estará ubicado, como ya se ha citado anteriormente, en el puesto de mando del gestor ferroviario, y compone el subsistema de red y conmutación NSS, junto con otros elementos (red inteligente IN, bases de datos HLR, VLR, etc.) así como los enlaces que los comunican tanto entre sí como con otros sistemas.

➤ **Supervisión de red**

La operación y mantenimiento de este tramo se realizará como se detalla a continuación:

- Se realizarán las configuraciones necesarias en los servidores OMC-R ya existentes del administrador de infraestructuras ferroviarias, que monitorizan el funcionamiento del sistema GSM-R de toda la red global, de modo que quedará integrado el nuevo tramo Madrid-Ávila, con sus respectivas estaciones bases. Además se deberá actualizar y/o dar de alta en el sistema de gestión de repetidores los nuevos equipos repetidores que se instalen para esta nueva línea.

- Subsistema de rectificadores: se implementará un sistema de supervisión de los equipos de energía instalados en todos los emplazamientos.

- Se instalará una consola GSM-R en el puesto de control del gestor que regulará la nueva banda Madrid-Ávila.

2.3.4. TOPOLOGÍA DE LA RED

Para la conexión entre BSC y BTS's se configurará una topología de red en anillos, la cual permite tener dos caminos de comunicación entre la BSC y las BTS's que están bajo su control. Estos enlaces de comunicaciones (E1) estarán soportados por el sistema de transmisión de comunicaciones fijas (SDH).

La red fija estará soportada por anillos físicos de fibra óptica, de forma que la BSC estará unida con todas las BTS's que controla mediante un anillo de fibra óptica. A su vez, en base a esa red física, se establece una red lógica mediante sistemas STM-1 por los cuales se establecen anillos lógicos E1 que unen la BSC con 4-5 BTS's. Todo ello se explicará con más detalle en el Capítulo 6: 'Sistema de transmisión'.

La BSC concentrará toda la información procedente de todas y cada una de las BTS's para enviarla a la TRAU, que a su vez reenviará dicha información, normalizada en canales de 64 Kbps, al centro de conmutación (MSC), para realizar la conmutación y gestión de todas las llamadas.

Las TRAU's se instalarán junto a las MSC's. Para realizar la conexión entre dichas unidades y las BSC's se emplearán los enlaces E1 correspondientes de acuerdo al Estudio de tráfico.

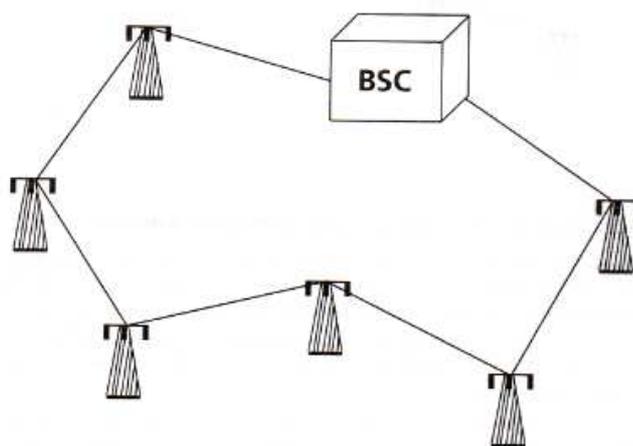


Figura 5: Topología. Configuración en anillo [1]

2.4 Calidad de servicio

El sistema cumplirá las últimas especificaciones técnicas y funcionales obligatorias correspondientes a los proyectos EIRENE y MORANE, mientras que se especificarán ciertas funcionalidades opcionales pero necesarias para su uso en la red nacional. Además se soportará el conjunto de servicios que corresponden a una red PLMN basada en el estándar GSM fase 2+.

Se realizarán las pruebas necesarias en base a la norma O-2475 (ERMTS/GSM-R Quality of Service Test Specification) versión 3.0 de la U.I.C. de QoS de GSM-R para ERTMS.

* Para ulterior información consultar referencias [18] y [19], sobre las pruebas QoS en GSM-R.

2.4.1. DEFINICIONES

Se definen a continuación los parámetros que se tendrán en cuenta en las medidas de red para garantizar la calidad de servicio en el sistema, y que se fijarán siguiendo las especificaciones descritas por EIRENE y MORANE.

* **Tiempo de conexión o establecimiento:** Es el tiempo que transcurre desde que un usuario realiza una petición de conexión hasta que la conexión queda establecida.

* **Probabilidad de no establecimiento de la conexión:** Es la probabilidad de que pasado el tiempo máximo permitido, la conexión no se haya establecido.

* **Probabilidad de desconexión:** Es la probabilidad de que una llamada o conexión ya establecida se interrumpa.

* **Retardo de transmisión:** Es el retardo extremo a extremo, desde que el transmisor decide transmitir hasta que el receptor ha terminado de recibir la información correspondiente.

* **Probabilidad de fallo:** Al realizarse las transmisiones de forma digital, se pueden producir errores en los bits a causa de fallos en la sincronización o por características de la interfaz radio. Los errores puntuales se protegen mediante mecanismos correctores FEC (Forward Error Control), basados en codificación y entrelazado de los datos. Sin embargo estos mecanismos no pueden corregir una ráfaga de errores provocados por un desvanecimiento de la potencia recibida por el receptor, es decir, una ráfaga de errores en un gran número de bits. La duración de estas ráfagas es lo que llamamos tiempo de duración de fallo. El tiempo que transcurre entre dos ráfagas, durante el cual el medio está libre de errores, es el tiempo de recuperación. Los algoritmos de corrección FEC pueden llegar a corregir ráfagas de errores si su duración es corta y el tiempo de recuperación es lo suficientemente largo.

La probabilidad de fallo es la probabilidad de que en una transmisión se produzca una ráfaga que no pueda ser corregida.

* **Velocidad de transmisión:** Es el número de bits recibidos por unidad de tiempo.

Se puede distinguir:

- Velocidad del canal: mide la tasa bruta de transmisión, en bits/seg.

- Velocidad efectiva de transmisión: no considera la redundancia de datos o las retransmisiones de paquetes por errores o pérdidas. También se mide en bits/seg.

* **Disponibilidad:** Es la probabilidad de que la red GSM-R se encuentre en un estado libre de errores, pudiéndose cursar la comunicación deseada satisfactoriamente.

2.4.2. PRESTACIONES DEL SISTEMA

La calidad de servicio es un parámetro estrechamente relacionado con la disponibilidad de la red, el retardo y la probabilidad de traspaso y establecimiento de conexiones, así como con la probabilidad de error, la cual mantiene a su vez relación directa con la capacidad y la cobertura.

Una red GSM-R requiere un grado de disponibilidad muy alto, un bajo retardo de traspaso y conexión y una tasa de error de bit muy reducida, para garantizar la continuidad y seguridad, especialmente en los aspectos relacionados con las comunicaciones de datos y las comunicaciones de voz con terminales embarcados.

Los principales efectos de la velocidad a la que circulan los trenes son:

- Mayor distorsión de las señales de radio.
- Menos tiempo para realizar los trasposos.

Para asegurar una buena calidad de servicio se han de solucionar estos problemas. Para ello se utilizarán algoritmos de eliminación de distorsión por velocidad, que funcionan hasta 500 km/h y procedimientos de traspaso anticipado de llamada.

Las prestaciones mínimas de calidad de servicio del sistema GSM-R que se instalará quedan resumidas en la siguiente tabla, especificadas por EIRENE/ MORANE. [14] [15] y [16].

Tiempo de establecimiento de la conexión extremo a extremo < 5 seg.
Tiempo de conexión de una llamada de emergencia < 2 seg.
Probabilidad de fallo en el establecimiento de la conexión < 10^{-3}
Probabilidad de desconexión < 10^{-4}
Tasa de error de bits para el canal de tráfico < 10^{-4} durante el 90 % del tiempo
Retardo extremo a extremo máximo/datos: 700 mseg.
Retardo extremo a extremo medio/datos: de 400 a 500 mseg.
Retardo extremo a extremo medio/voz: 90 mseg.
Retardo de un mensaje de texto (SMS) < 30 seg el 95% de los mensajes
Velocidad de transmisión datos: entre 9,6 Kbps 4,8 Kbps y 2,4 Kbps
Probabilidad de pérdida de la conexión durante el handover < 10^{-4}
Duración máxima del handover (tiempo de corte de la comunicación): 300 ms.
Tiempo máximo para indicar la pérdida de conexión < 1 seg
Probabilidad de fallo (1) < 10^{-3}

(1) Para ráfagas de duración inferior a 1 segundo y separadas al menos 5 segundos.

Tabla 2: Tabla de prestaciones del sistema GSM-R. [fuente: EIRENE-MORANE]

Para llevar un control de la calidad de servicio de la red, el OMSS supervisará las comunicaciones y dispondrá de registros para almacenar toda la información relevante en este sentido. Se registrarán los siguientes parámetros: tiempo de establecimiento de llamada, retardos de extremo a extremo, tiempos de *handover*, *handovers* fallidos, numeración no resuelta, tasa de caída de llamadas, intentos de conexión fallidos, desconexiones indeseadas ocurridas.

➤ **Handover:**

El *handover* es el proceso de traspaso de una llamada de una celda a otra. Este proceso se realizará con el fin de maximizar la calidad de la transmisión tanto en el canal descendente como en el ascendente. Cuando el nivel de potencia recibido de la estación base que da servicio a un terminal es demasiado bajo, se degrada la calidad y se hace necesario un proceso de *handover*.

Entonces el terminal se sincroniza a la siguiente estación base, de la que recibe mayor potencia y continua así la llamada. Este proceso deberá ser rápido y seguro y debe funcionar para velocidades de hasta 500 Km/h.

Los parámetros que se han de cumplir según EIRENE son:

- Tasa de procesos de *handover* logrados: > 99,5%.
- Tiempo de proceso máximo: < 300 ms.

➤ **Itinerancia (Roaming):**

El sistema GSM-R a instalar se basará en una red EIRENE de carácter nacional pero de forma que el sistema permita el proceso de itinerancia para los trenes, tanto nacionales como internacionales que entran en (o abandonan) un área MSC de ámbito nacional.

Las transacciones fallidas en el proceso de itinerancia no superarán el 0,5% del total y el tiempo invertido no será mayor a 10 segundos según especificaciones de EIRENE

➤ **Transmisión:**

La red GSM-R proporcionará transmisión digital extremo a extremo y garantizará el transporte de la información demandada por los diferentes servicios. Se incluye tanto la codificación y transmisión de voz digitalizada, como la adaptación de velocidades para la transmisión de datos. Además, la red GSM-R permitirá la interconexión con otras redes de conmutación de circuitos o de paquetes, tanto internas como externas. Se soportará la transmisión de señales vocales y de datos.

a) Transmisión de Voz:

La transmisión de las señales de voz a través de GSM-R se realizará según lo especificado por los documentos del ETSI para GSM Fase 2+ en todo lo referido a ecualización, modulación, codificación, sincronización, conversión de señales y calidad de servicio. Y en todo momento se satisfarán los requerimientos y prestaciones exigidos por EIRENE y MORANE. Además se cumplirán las recomendaciones del CCITT y de la UIT para la interconexión con otras redes públicas o privadas de conmutación telefónica PSTN/PLMN.

b) Transmisión de datos y SMS:

En lo referente a modulación, codificación digital, sincronización, conversión de señales y calidad de servicio, la transmisión de datos y SMS se realizará igualmente conforme a lo especificado por los documentos del ETSI para GSM Fase 2+, satisfaciendo a su vez los requerimientos exigidos por EIRENE y MORANE. Además se cumplirán las recomendaciones del CCITT y de la UIT de referencia para la interconexión con otras redes de transmisión de datos, públicas o privadas, de conmutación de circuitos o de paquetes.

*** Seguridad de las comunicaciones:**

El sistema garantizará protección en dos puntos principales, en lo que a seguridad se refiere:

- i) El acceso no autorizado a la red: suplantación fraudulenta.
Problema que se solucionará mediante la autenticación de los terminales. Ésto se realizará mediante dos mecanismos: Código PIN e Identificador IMSI (Internacional Mobile Subscriber Identity) + clave secreta.
- ii) Protección de los datos de usuario transmitidos por la red: privacidad.
La transmisión de información realizada por el usuario a través de la red GSM-R será segura, impidiendo la interceptación fraudulenta de los datos por terceros.

2.5

Servicios del sistema GSM-R

2.5.1. SERVICIOS DE VOZ

La red GSM-R soportará los siguientes servicios de voz:

- Llamadas de voz punto a punto
- Llamadas de emergencia
- Llamadas de difusión
- Llamadas de grupo
- Multiconferencia

Todos estos servicios funcionarán con cualquier combinación de terminales, ya sean de cabina, portátiles o fijos.

Las llamadas de difusión permitirán comunicación unidireccional, de un único usuario hacia múltiples usuarios, en un área de localización concreta.

Las llamadas de grupo permitirán la comunicación entre los usuarios de un grupo dentro de un área de localización. Cualquier usuario del grupo podrá hablar, y los demás escucharán, pero sólo podrá hablar uno simultáneamente. En las llamadas de difusión o llamadas de grupo, se podrá determinar el área de influencia de dichas llamadas. En general, cualquier llamada de difusión o de grupo iniciada en un área de localización será difundida en esa área, tanto en terminales móviles como pertenecientes a la red fija. Los terminales que durante la llamada salgan del área de localización se desconectarán de la llamada y de la misma forma, los que entren se unirán automáticamente a ella.

Las llamadas en multiconferencia permitirán la comunicación simultánea de hasta seis usuarios.

Además se soportarán una serie de servicios suplementarios relacionados con las llamadas:

- Presentación de la identidad del llamante y del abonado, indicando su número telefónico.
- Restricciones configurables a la hora de presentar identificaciones. La red será capaz de ocultar la identidad de ciertos usuarios.
- Prioridad y uso de preferencia. Se podrá asignar a cada llamada un orden de preferencia. Cuando se realice una llamada de prioridad alta a un terminal que esté realizando una de menor prioridad, se desconectará para dar paso a la nueva llamada (prioritaria).
- Grupo cerrado de usuarios. Ningún usuario que no esté en la lista de usuarios permitidos podrá acceder a los servicios que ésta ofrece.
- Desvío de la llamada. Los usuarios podrán redireccionar las llamadas de su terminal a otros terminales de la red.
- Retención de llamada. Se permitirá abandonar una llamada temporalmente, dejándola retenida.
- Llamada en espera. La red informará a un usuario, mientras está realizando una llamada, de que otros usuarios están intentando contactar con él.

También se soportarán una serie de servicios específicos de uso ferroviario:

- Direccionamiento funcional.
- Direccionamiento dependiente de la localización.
- Modo de maniobras.
- Llamadas de emergencia ferroviarias.
- Comunicaciones con el personal del interior del tren.

En la tabla siguiente se puede observar, según EIRENE, las funcionalidades obligatorias (Ob) y opcionales (Op) según el tipo de terminal.

LLAMADAS DE VOZ	Terminal de cabina	Terminal de propósito general	Terminal de operación y mantenim
Llamadas punto a punto	Ob	Ob	Ob
Llamadas de emergencia	Ob	Ob	Ob
Llamadas de difusión	Ob	Ob	Ob
Llamadas de grupo	Ob	Ob	Ob
Llamadas multiconferencia	Ob	Op	Op

Tabla 3: Servicios de voz según el tipo de terminal. Fuente: EIRENE.

2.5.2. SERVICIOS DE DATOS

La red GSM-R soportará los siguientes servicios de datos:

- Mensajes de texto
 - Punto a punto con destino al móvil.
 - Punto a punto con origen en el móvil.
 - Difusión en una celda (punto a multipunto).

- Aplicaciones de datos genéricas.

La red soportará el envío de mensajes de texto, tanto punto a punto, como punto a multipunto y comunicación de datos punto a punto de al menos 2,4 Kbps y hasta 9,6 Kbps.

SERVICIO DE DATOS	Terminal de cabina	Terminal de propósito general	Terminal de operación y mantenim
Mensajes de texto	Ob	Ob	Ob
Aplicaciones genéricas de datos	Ob	Op	Op
Fax automático	Op	Op	Op
Aplicaciones control de tren	Op	Op	Op

Tabla 4: Servicios de datos según el tipo de terminal. Fuente: EIRENE.

CAPÍTULO 3:

PLAN DE COBERTURA

RADIOELÉCTRICA

3.1 CODIFICACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS

3.2 CONSIDERACIONES GENERALES

3.3 METODOLOGÍA Y CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN

3.3.1 METODOLOGÍA DE PLANIFICACIÓN

3.3.2 CRITERIOS DE PLANIFICACION

3.4 DISEÑO DE LAS CELDAS

3.4.1 CONCEPTO DE CELDA COMPUESTA

3.4.2 HANDOVER

3.5 CONFIGURACIÓN DE LAS ESTACIONES BASE

3.5.1 ESTACIÓN BASE

3.5.2 SISTEMA RADIANTE

3.6 BALANCE ENLACE ESTACION BASE

3.6.1 RESULTADOS DE LA PLANIFICACIÓN RADIOELÉCTRICA

3.7 COBERTURA EN TÚNELES

3.7.1 LIMITACIONES IMPUESTAS POR EL SISTEMA

3.7.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES

3.7.3 CONFIGURACIÓN DEL EQUIPAMIENTO EN TÚNELES

3.8 SOLUCIÓN FINAL

CAPÍTULO 3: PLAN DE COBERTURA RADIOELÉCTRICA:

Un plan de cobertura tiene por objeto ubicar y dimensionar las BTS's y establecer sus parámetros tanto radioeléctricos (potencia, tipo y ganancia de las antenas, etc.), como los parámetros de otra índole (altura de la torre donde se instalará la antena, etc.). Este plan de cobertura se elabora a partir de los requerimientos del cliente, de las especificaciones EIRENE/MORANE para GSM-R, de las características de los equipos y sistemas, de las características del trazado y de la tipología del terreno.

En este capítulo se describe la planificación de esta red radio en la línea Madrid-Ávila. Debido a la existencia de túneles de diferentes longitudes en el trazado, se requiere también la utilización de un determinado número de repetidores.

3.1 Codificación de emplazamientos

Durante la redacción de este proyecto se ha considerado la siguiente codificación de emplazamientos:

*** Codificación tipo para BTS:**

BTS | XX

BTS: Para diferenciar entre BTS o repetidor.

XX: Número de la BTS, comenzando la numeración desde Madrid.

*** Codificación tipo para Repetidor:**

FOR | YZ

FOR: Para diferenciar entre BTS o repetidor.

Y: Número de la BTS de la que depende.

Z: Número del repetidor, comenzando nuevamente para cada cadena de repetidores de cada BTS.

El nivel de cobertura se define como la potencia medida en el puerto de una antena isotrópica de ganancia 0 dBi situada 4 m por encima de la vía. Ésta es la altura a la que se encuentra dicha antena ya que se ubicará sobre la estructura del tren.

➤ Requerimientos EIRENE

Para hacer compatible la red GSM-R con el estándar europeo EIRENE proyectado por la UIC, se deberán cumplir una serie de requisitos. Los más relevantes son los que se detallan a continuación: [15]

- Valor exigido del nivel de cobertura:

- Nivel de cobertura de -98 dBm con una probabilidad de 95% para voz y datos no críticos.
- Nivel de cobertura de -95 dBm con una probabilidad de 95% en líneas con ETCS (European Train Control System) y para velocidades inferiores o iguales a 220 Km/h.

- Valor recomendado del nivel de cobertura

- Nivel de cobertura de -92 dBm con una probabilidad de 95% en líneas con ETCS y para velocidades superiores a 280 Km/h.
- Nivel de cobertura entre -95 dBm y -92 dBm con una probabilidad de 95% en líneas con ETCS y para velocidades superiores a 220Km/h e inferiores a 280Km/h.

- El tiempo máximo de corte temporal de la comunicación será 300 ms, como ya se especificó en la tabla 2.

- La potencia máxima de transmisión del Terminal de Cabina (Cab Radio) para uso del conductor u otro tipo de personal será de 8 W.

- El Terminal de operaciones para uso de personal de vía durante operaciones de mantenimiento así como el Terminal de propósito general (General Purpose Radio) tendrán una potencia máxima de transmisión de 2 W.

De acuerdo con EIRENE, debe asegurarse la cobertura durante el 95% del tiempo en el 95% del área objetivo. Por otra parte, la norma indica también que con una probabilidad del 95% el nivel recibido debe superar el valor umbral en cualquier intervalo de localización de longitud 100 m. Debido a esto será necesario considerar también un margen por desvanecimiento.

La banda de frecuencias para GSM-R es, de acuerdo con la UIC, 876 - 880 MHz para el enlace ascendente y 921 - 925 MHz para el descendente. Dado que la cobertura se define para el enlace descendente, para los cálculos de atenuación se utilizará la frecuencia central de la banda superior, es decir, 923 MHz.

➤ **Requerimientos aplicables al plan de cobertura**

El gestor nacional establece sin embargo unos mínimos de cobertura más restrictivos que los exigidos o recomendados por EIRENE / MORANE. Estos valores mínimos de nivel de potencia de recepción en una antena ideal sin pérdidas se establecen en:

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

Como se puede comprobar, en ambos casos los niveles de cobertura son más restrictivos que los exigidos por EIRENE.

Los terminales portátiles tienen antenas de ganancia 0 dB, y, por lo tanto, se supondrá una ganancia nula en todos los terminales. Los terminales que se considerarán para el estudio serán capaces de proporcionar como mínimo 8 W de potencia de emisión (requisitos de EIRENE) y tendrán una sensibilidad en recepción menor o igual a -104 dBm.

La planificación radio se llevará a cabo para el terminal de cabina, cuya antena isotrópica de ganancia 0 dBi se considera ubicada a 4 m de altura sobre la vía, ya que esta misma estará instalada sobre la estructura del tren.

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. Se sabe que 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 segundos, dependiendo de las circunstancias particulares de cada handover.

En la figura 6 se define gráficamente la distancia de solape o de solapamiento.

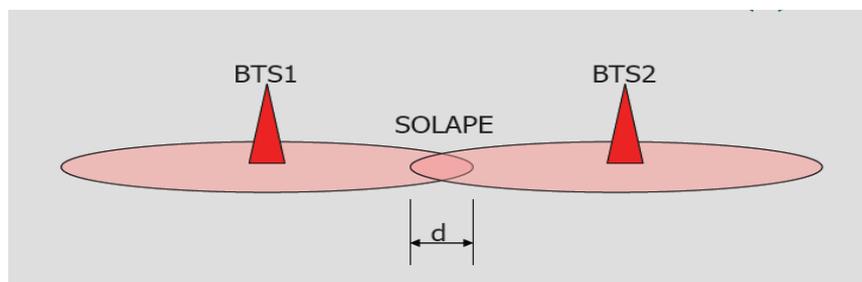


Figura 6: Distancia de solapamiento [22]

En la figura 7 se muestra una gráfica donde se puede apreciar la variación de esta distancia de solapamiento (en metros) en función de la velocidad del tren, considerando el citado tiempo (6 segundos) para la realización del proceso de *handover*.

Como se puede observar en la gráfica, para velocidades de 300 Km/h por ejemplo, la zona de solapamiento será de 500 metros aproximadamente. De esta forma, se determinará la configuración del sistema del modo más adecuado con el objeto de minimizar el número de handovers a realizar a lo largo del trayecto.

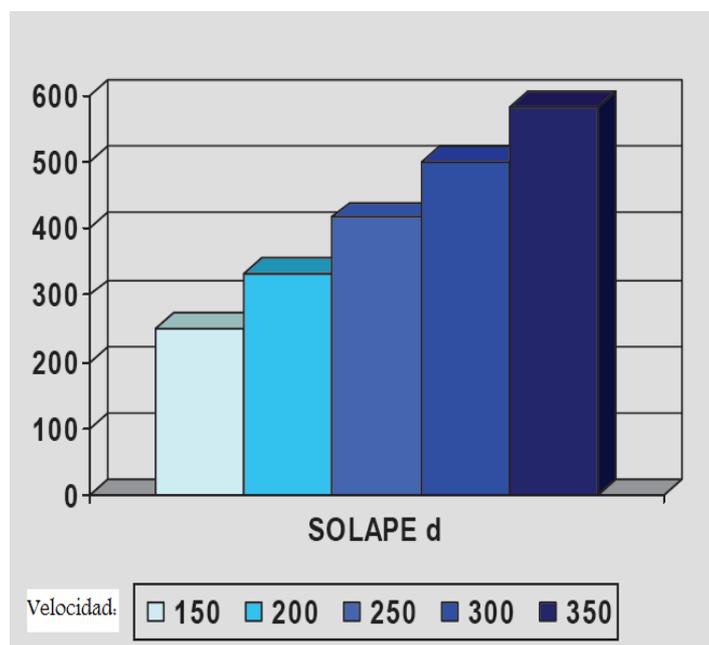


Figura 7: Distancia de solape (en metros) en función de la velocidad. [22]

El área de cobertura radioeléctrica comprenderá, además del trazado de la línea, un área de unos cientos de metros alrededor de instalaciones fijas, como apartaderos, bases de mantenimiento, caminos de servicio, etc., de modo que los operarios en tareas de mantenimiento en los alrededores de la vía también dispongan de los niveles exigidos de cobertura para el correcto desarrollo de su trabajo.

3.3 Metodología y criterios de planificación

3.3.1. METODOLOGÍA DE PLANIFICACIÓN

Primeramente, serían necesarias varias visitas a la vía para tener conocimiento completo de su trazado y con el fin de determinar la ubicación de posibles emplazamientos GSM-R. Sin embargo, como el proyecto es teórico, y dicha línea de momento no existe, este paso no podrá ser realizado.

Se utilizaría a continuación una herramienta de simulación que, sobre los planos digitales del trazado de la línea, lo más ajustados posible a la realidad, y tras la introducción de diversos parámetros solicitados por dicha herramienta (tipo de antena, altura, etc.), daría como resultado los mapas digitales con la cobertura que ofrecerían los diversos emplazamientos a lo largo de toda la línea.

Finalmente se elaborarían planos específicos para cada uno de los emplazamientos planificados. Según los métodos de planificación considerados, cuando se alcanza línea de vista con la antena se consiguen los niveles de potencia requeridos, siempre y cuando estemos dentro del radio máximo de celda. Por lo que para completar la planificación, en algunos emplazamientos podría interesar revisar la línea de vista para comprobar que no existan accidentes geográficos ni nuevas construcciones que no vengan reflejadas en los mapas digitales, los cuales podrían dar lugar a zonas de sombra en la cobertura.

*** Realización de medidas de cobertura radioeléctrica**

Consistiría en realizar pruebas de cobertura radioeléctrica en puntos singulares del trazado que pueden ser considerados de difícil cobertura para comprobar los resultados de la planificación inicial. En estas pruebas se utiliza una estación base como transmisor con la antena transmisora ubicada a la altura considerada en la planificación (4 metros).

Los casos que se pueden considerar de difícil cobertura pueden ser aquellos en los que exista una zona de trincheras (zona que queda entre dos taludes) o una zona en la que exista algún tipo de obstáculo, además de túneles en los que se puede encontrar un cambio en la sección de los mismos. Con ello se pretende comprobar la planificación inicial y verificar si alguno de los emplazamientos o sectores no es necesario, o si por el contrario se necesita algún emplazamiento adicional en algún punto concreto.

*** Medidas de espectro**

Estas medidas están destinadas a verificar que a lo largo de la traza no existe ocupación de canales radio reservados a la banda GSM-R.

3.3.2. CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN

Aunque existen modelos teóricos que permiten evaluar las pérdidas de propagación, en la práctica su caracterización exacta se ve dificultada por la insuficiencia de los datos relativos a las características del terreno y a la complejidad que presentan algunos de los modelos teóricos.

Aunque los avances de la informática permiten la aplicación de modelos cada vez más complejos, las limitaciones en cuanto a la caracterización del terreno son inevitables. La cartografía digital se basa en un muestreo en el que inevitablemente se pierden detalles.

Por todo ello se recurre en la práctica a modelos de propagación que permitan una evaluación aproximada, con suficiente grado de fiabilidad, a partir de los datos disponibles. Esta evaluación incluye una componente estadística que elimina tanto la propia variabilidad del fenómeno natural como la limitación de los datos utilizados.

Estos modelos pueden basarse en medidas realizadas (modelos empíricos), o en modelos teóricos con ajustes posteriores en función de resultados experimentales (modelos semiempíricos).

El gestor de infraestructuras nacional utiliza habitualmente el método de Okumura-Hata. Éste es un modelo empírico para la predicción de la propagación que proporciona predicciones de la pérdida de propagación para diferentes tipos de entorno, y en función de las condiciones del enlace (frecuencia, altura de antenas...).

Para el diseño del plan de cobertura en los túneles se ha de tener en cuenta las propiedades de los equipos repetidores y estaciones base, así como las características de cada túnel: la longitud, gálibo y curvatura de los mismos con el fin de minimizar el equipamiento necesario.

También se puede considerar interesante la instalación de repetidores en campo abierto, en casos concretos, con objeto de ampliar la zona de cobertura de la estación base de la que dependen, principalmente en zonas de trincheras o densamente urbanas, sin tener que recurrir a la instalación de una nueva estación base.

Dado que el presente es un proyecto teórico, no se realizará el mencionado trabajo de campo. En su lugar se hará uso de la herramienta 'Google Earth' para obtener las coordenadas exactas de cada BTS, así como diversos documentos facilitados por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias que recogen la orografía del tramo comprendido en este proyecto.

* NOTA: Los emplazamientos planificados podrían sufrir alguna variación tanto en los equipos instalados como en la ubicación de los mismos tras los replanteos definitivos, los cuales son imprescindibles.

3.4.1. CONCEPTO DE CELDA COMPUESTA

En las instalaciones de las estaciones base que se construirán a lo largo de la línea estudiada en el presente proyecto se utilizará, de forma general, la celda compuesta: Se colocarán dos antenas direccionales para cada estación base, estando cada una de ellas orientada en cada dirección de la vía. Estas antenas se combinarán por medio de un divisor de potencia y se conectarán a los mismos transeptores dentro de la BTS. De esta forma se reduce el número de *handovers* a lo largo de la línea.

Por lo general, la cobertura queda garantizada con dos sectores empleados para cubrir la vía. Para ello, se utilizarán dos tipos de antenas de polarización cruzada, una de ancho de haz horizontal de 65° y 17 dB de ganancia, que será la generalmente utilizada, y otra de 30° y 21 dB, para aquellos casos en el que el trazado sea especialmente rectilíneo y pueda ser aconsejable su mayor ganancia. La planificación de cobertura en túneles se tratará más adelante como caso particular.

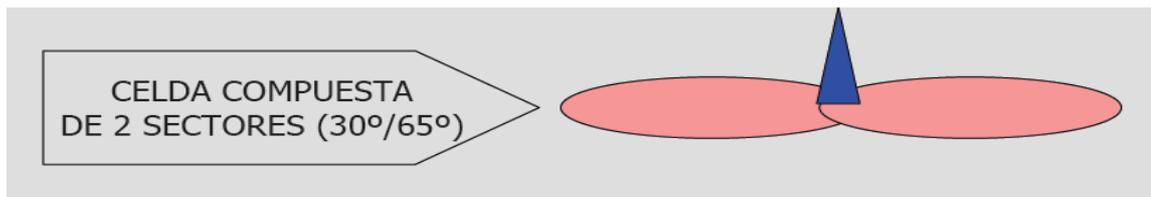


Figura 8: Celda compuesta [22]

3.4.2. HANDOVER

El *handover*, como ya se ha mencionado anteriormente, es el proceso mediante el cual una llamada se transfiere desde una celda hasta otra. Gracias a este proceso, es posible transitar por diferentes celdas sin interrupción de la llamada y de forma completamente automática.

*Tipos de handover

Los *handovers* se pueden clasificar según diferentes criterios

- Según las causas que provocan el inicio de un *handover*, estos se podrían clasificar en:

a) Obligatorio:

- Calidad: la calidad del enlace es demasiado baja, es decir, la bit error rate, BER, es demasiado alta.
- Nivel de señal: la potencia recibida es demasiado baja.
- Distancia: la distancia entre la estación base y el móvil es demasiado alta.

b) Opcional:

- Mejor servidora: recibe mejor señal de otra celda distinta a la servidora.
- Tráfico: se superan los niveles de carga establecidos.

- Según los elementos de la red entre los que se produzca el traspaso:

- 1) Intracell Handover: tiene lugar entre canales de la misma estación base.
- 2) IntraBSC Handover: tiene lugar entre celdas pertenecientes a la misma BSC.
- 3) IntraMSC Handover: entre celdas pertenecientes al mismo MSC, pero distintas BSC's.
- 4) InterMSC Handover: tiene lugar entre BTS's conectadas a diferentes MSC's.

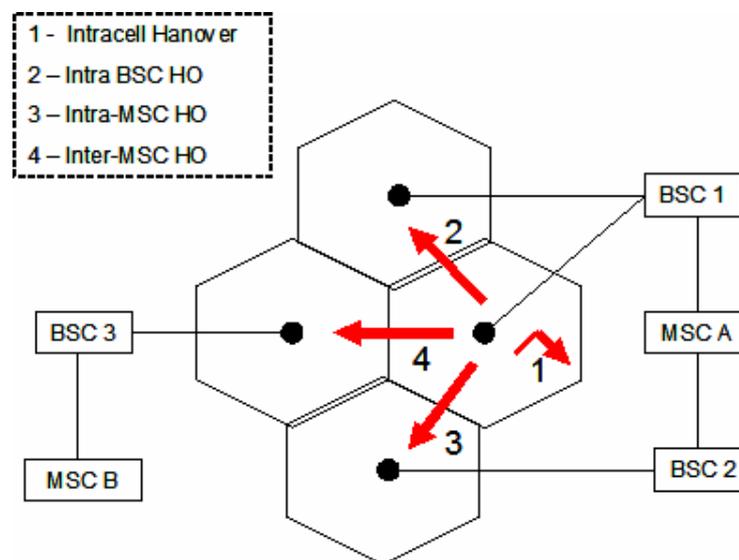


Figura 9 : Posibles *handovers* según los elementos de la red entre los que se produzca el traspaso.

Solapamiento de la cobertura

Gracias a los *handovers* es posible mantener una llamada en curso, por lo que es muy importante una correcta definición de las celdas vecinas. La lista de celdas vecinas consiste en una lista para cada estación base, en la que se definen las posibles celdas con las que la primera puede realizar *handover*, siendo estas celdas vecinas las inmediatamente próximas.

Debe tenerse en cuenta el periodo de medición del móvil para realizar el *handover*, que dependerá de la longitud de la correspondiente ventana de promediado de medidas, una medida cada 480 ms*, el tiempo necesario para dicho promediado, el tiempo de ejecución del *handover* y un margen adicional de seguridad. El tiempo total para realizar un *handover*, incluyendo el periodo en el que el móvil está realizando y promediando medidas, es inferior a 6 segundos, dependiendo de las circunstancias particulares de cada *handover*.

* Según la especificación ETSI GSM03.09 "Digital Cellular Communication System (phase 2+) (GSM); Handover procedure.

Por lo tanto, y como ya se mencionó anteriormente, se requiere un tamaño suficiente del área de solapamiento entre celdas vecinas para garantizar una ejecución segura del handover en condiciones de alta velocidad del móvil. Los niveles de ambas celdas vecinas dentro del área de solapamiento serán superiores a los niveles mínimos requeridos en una antena ideal sin pérdida. En el apartado de ‘requerimientos aplicables’ de este mismo capítulo queda establecida la zona de solapamiento mínima entre celdas para asegurar el mantenimiento de una llamada.

3.5 Configuración de la Estación Base

3.5.1. ESTACIÓN BASE

Se considerará un tipo de estación base que pueda configurarse con un mínimo de ocho portadoras. La estación base de una celda tipo se encontrará configurada con un transceptor activo y con otro de reserva, en standby, lo que supone una configuración de la estación base denominada 1+1, excepto en aquellas estaciones base en las que el estudio de tráfico (Capítulo 5) determine la utilización de más transceptores activos, cuya configuración se denominará n+1, siendo n el número de transceptores activos + 1 transceptor *en standby*.

La estación base debe proporcionar un mínimo de 60 W de potencia de salida por transceptor, según EIRENE. El combinador debe tener un filtro dúplex que combine en un mismo camino las señales de transmisión y de recepción para alimentar dos antenas y capacidad para un máximo de ocho portadoras. Además, permitirán una doble recepción de la señal necesaria para obtener ganancia por diversidad. [1]

La estación base debe ser lo suficientemente modular como para soportar las diferentes configuraciones posibles y para soportar futuras ampliaciones.

3.5.2. SISTEMA RADIANTE

Como ya se mencionó con anterioridad, en las instalaciones de las estaciones base que se construirán se utilizará la celda compuesta. De modo que, como norma general, se colocarán dos antenas direccionales para cada estación base, estando cada una de ellas orientada en cada dirección de la vía. Estas antenas se combinan por medio de un divisor de potencia y se conectan a los mismos transceptores dentro de la estación base.

La configuración básica de una celda tipo consiste en un transceptor que alimenta a dos antenas de polarización cruzada mediante un divisor de potencia.

➤ Antenas

Las antenas direccionales que se utilizarán para esta línea deberán trabajar en la banda de frecuencias comprendida entre los 870 y 960 MHz e incluirán diversidad de polarización, a +45° y a -45°, en una sola estructura. Este tipo de antenas proporcionan una protección adicional, en el enlace ascendente, frente a desvanecimientos rápidos provocados por la propagación multitrayecto (efecto Rayleigh), consiguiendo una ganancia media por diversidad de entre 2 y 5 dB.

Por otro lado, el otro tipo de antenas consideradas serán de polarización circular que favorece la propagación en el interior de los túneles.

Los modelos de antena a instalar son los siguientes:

- Antena de polarización cruzada con ancho de haz de 65° horizontal y 9.5° vertical, con una ganancia de 17 dB y una ratio *Front – Back* mayor de 30 dB.
- Antena de polarización cruzada con ancho de haz de 30° horizontal y 7° vertical con una ganancia de 21 dB y una ratio *Front – Back* mayor de 30 dB.
- Antenas de polarización circular con un ancho de haz de 28°, con una ganancia de 15 dB y una ratio *Front – Back* mayor de 20 dB.

* Ratio *Front/Back*: Relación existente entre la máxima potencia radiada en una dirección geométrica y la potencia radiada en la dirección opuesta a ésta. (180°). Se mide en dB.

➤ Elementos no radiantes

Dependiendo de la altura a la que se coloquen las antenas, el cable coaxial a utilizar será de diferente tipo. De esta forma, para torres de hasta 25 m en las que la longitud del cable será de aproximadamente 30 m, el cable coaxial será de ½” con atenuación de 6,78 dB/100 m, mientras que para torres de hasta 40 m en las que la longitud del cable será de aproximadamente 45 m, el cable coaxial será de 7/8” con atenuación de 3,81 dB/100 m.

En cuanto a los divisores de potencia a utilizar, deberán trabajar en la banda de frecuencias indicada, y ser simétricos, con relación de reparto 1/2 y pérdidas de inserción menores o iguales a 0.2 dB, según especificaciones del gestor nacional.

* Datos tomados del fabricante “Andrews”. [23]

3.6 Balance de enlace estación base

Se entiende por balance del enlace el cálculo de las pérdidas de potencia que sufre la señal en su camino desde el emisor hasta el receptor y viceversa.

- Enlace ascendente: considera la estación móvil como emisora y la BTS como receptora.
- Enlace descendente: considera la estación móvil como receptora y la BTS como emisora.

Para asegurar que los radios de cobertura de ambos enlaces sean iguales, es decir, que el usuario quede cubierto por la BTS en todo su radio de cobertura, así como que la BTS pueda recibir señal del usuario en su respectiva área de cobertura, estas pérdidas deben fijarse a un valor similar.

Para estos cálculos se ha tomado como referencia una BTS tipo compuesta por una torre de 30 m de altura, dos antenas de polarización cruzada y divisores de potencia simétricos, ya que será la instalación más habitual para este Proyecto. A continuación se exponen los demás supuestos considerados para este estudio de balance de enlace.

* Requisitos de cobertura (del gestor nacional)

Como ya se especificó al inicio de este capítulo:

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

Se recomienda que el requerimiento de cobertura se cumpla al menos el 95% del tiempo sobre el 95% del área de cobertura.

* Estación base

Teniendo en cuenta lo especificado en el apartado de ‘configuración de la BTS’, la BTS puede quedar caracterizada del siguiente modo:

Potencia mínima de salida del transceptor de BTS	47.8 dBm (60W)
Pérdidas en combinador y duplexor	5 dB
Sensibilidad en recepción	-110 dBm
Pérdidas de cable coaxial y conectores	3 dB
Pérdidas en divisor de potencia simétrico	3.5 dB
Ganancia de antena de polarización cruzada	17 dBi

Tabla 5: Caracterización de una BTS para el balance de enlace BTS

* Datos tomados de “Siemens”.

* **Terminal**

Se considerará para este estudio el terminal en cabina (Cab radio) de los especificados en el apartado 'Requerimientos EIRENE'. De modo que éste se puede caracterizar de la siguiente forma:

Potencia de salida del terminal	39 dBm (8w)
Sensibilidad del receptor	-104 dBm
Ganancia de antena del terminal	0 dBi
Altura de antena de terminal.	4 m

Tabla 6: Caracterización del terminal para el balance de enlace BTS

* Datos tomados de Siemens.

Dicha altura de 4 metros supone una ganancia de aproximadamente 4 dB que se puede establecer por la siguiente expresión:

$$G_{\text{altura}} \approx 10 \log (h_2 / h_1);$$

Siendo:

$h_1 = 1.5$ m (altura de un terminal normal)

$h_2 = 4$ m (altura de la antena del terminal de a bordo)

* **Diversidad en recepción**

El tipo de antenas consideradas (de polarización cruzada) proporcionan, como ya se ha mencionado, una protección adicional en el enlace ascendente frente a desvanecimientos rápidos provocados por la propagación multitrayecto (efecto Rayleigh) consiguiendo una ganancia media por diversidad de entre 2 y 5 dB. Para el cálculo del balance de enlace se considerará el valor más restrictivo (2 dB).

* **Sensibilidad en recepción estación base**

Se entiende por sensibilidad la aptitud de un receptor para proporcionar una señal de salida de una calidad especificada con un nivel de entrada determinado. Se cuantifica especificando dicho nivel de entrada (en dBm).

Para establecer el nivel de recepción de la estación base se debe aplicar la diferencia existente entre la sensibilidad nominal del receptor (-104 dBm) y el nivel de planificación, (-85 dBm). Esto es, una diferencia de 19 dB sobre la sensibilidad de la estación base, -110 dBm, obteniendo que la sensibilidad que debe ser considerada en la estación base es de -91 dBm.

* Márgenes

a) Desvanecimientos:

Como ha quedado indicado en el apartado 'requerimientos EIRENE', se especifica que debe asegurarse la cobertura durante el 95% del tiempo en el 95% del área objetivo, y que con una probabilidad del 95% el nivel recibido debe superar el valor umbral en cualquier intervalo de localización de longitud 100 m. Para realizar este cálculo se procede de la siguiente forma:

El porcentaje de cobertura objetivo del 95% del área se corresponde con un porcentaje zonal, Z . Este valor puede traducirse a porcentaje de cobertura perimetral, L , considerando una ley de propagación potencial con exponente n , por medio de la fórmula:

$$Z = L + 50 \exp\left(\frac{2xy + 1}{y^2}\right) \operatorname{erfc}\left(x + \frac{1}{y}\right) \quad [1]$$

Donde:

$x = k(L) / \sqrt{2}$, siendo $k(\cdot)$ la función de distribución gaussiana normalizada inversa
 $y = 3,071 n / \sigma_L$, siendo σ_L la desviación típica de la variación con ubicaciones
 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ es la función error complementaria

Según la Recomendación P.1546 del UIT-R, la desviación típica respecto a localizaciones es $\sigma_L=8.5\text{dB}$ y respecto a variaciones temporales esta desviación es $\sigma_T=2\text{dB}$.

Tomando $n = 4$, que corresponde a un modelo de tierra plana ideal (el exponente n del método de Okumura-Hata se sitúa normalmente en torno a este valor), se obtiene $L = 85\%$.
($n = 4.49 - 0.665 \log(h)$) [1]

Finalmente, el margen para un porcentaje $L = 85\%$ de cobertura perimetral y $T = 95\%$ de cobertura temporal se calcula como

$$M = \sqrt{(\sigma_L k(L))^2 + (\sigma_T k(T))^2}$$

Sabiendo que $k(0.85) = 1.04$ y $k(0.95) = 1.64$, resulta un margen log-normal $M = 9.4 \text{ dB}$. El margen resultante es de aproximadamente 9 dB y determina la diferencia entre el valor en el que se alcanza el nivel requerido de -85 dBm durante el 95% del tiempo en un 85% del borde de la celda y el valor medio de la misma, -78 dBm .

b) Margen de Seguridad

En este margen se consideran diversas causas como el envejecimiento del equipamiento, cables, antenas o etc., los cambios en el entorno y una protección adicional frente a interferencias no deseadas. Este margen de seguridad se establecerá en 3 dB, valor recomendado por el ETSI en el informe técnico ETR103 (GSM 03.30) "Digital cellular telecommunication system (Phase 2); Radio network planning aspects".

➤ **CÁLCULO BALANCE DE ENLACE ESTACIÓN BASE:**

Es una condición importante que exista un enlace balanceado, para que no se produzcan situaciones en las que el usuario quede cubierto por la estación base en todo su radio de cobertura, pero que ésta no pueda recibir señal del usuario en su respectiva área de cobertura, o viceversa. En la siguiente figura se intenta reflejar gráficamente un ejemplo de enlace desbalanceado, en la que se aprecia que la señal no es recibida por la BTS, mientras que la estación móvil sí recibe señal de la BTS.

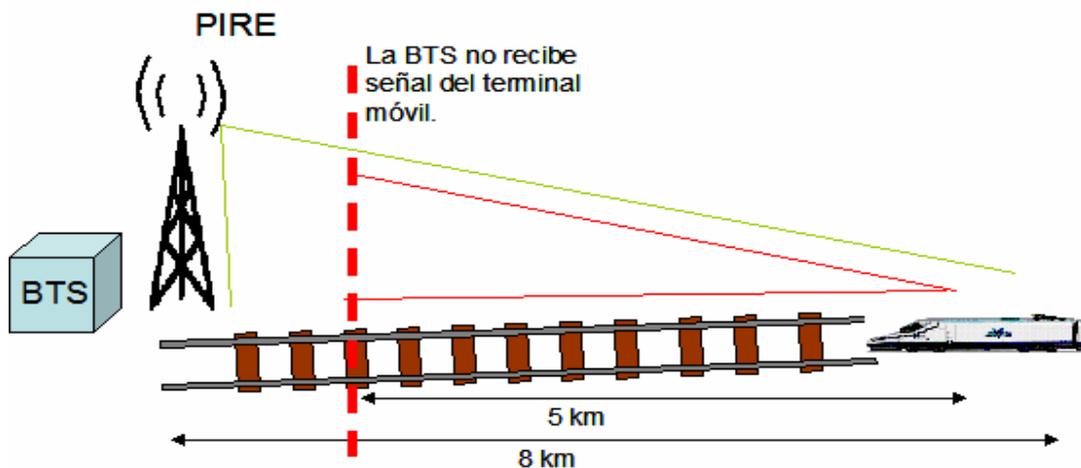


Figura 10: Balance descompensado

- Enlace Descendente

Potencia del transceptor de la BTS	47.8 dBm (60W)
Pérdidas en combinador y duplexor	- 5 dB
Pérdidas del cable coaxial y conectores	- 3 dB
Pérdidas en divisor de potencia simétrico	- 3.5 dB
Ganancia de antena de polarización cruzada	17 dBi
PIRE	53.3 dBm
Nivel de potencia exigido	- 85 dBm
Ganancia de antena del terminal	0 dBi
Ganancia altura antena del terminal	4 dB
Margen de desvanecimiento	- 9.4 dB
Margen de seguridad	3 dB
Atenuación compensable	129.9 dB

Tabla 7: Cálculo balance, enlace descendente

PIRE: Potencia Isótropa Radiada Equivalente de una antena, es el producto de la potencia suministrada a un antena por la ganancia isótropa de la misma. Se suele expresar en dB:

$$\boxed{\text{PIRE (dBm)} = \text{Pot} + G - \alpha} \quad [24]$$

Donde α recogerá a partir de ahora todas las pérdidas asociadas hasta el punto de estudio. En las tablas la PIRE se calcula como el sumatorio de todas las filas anteriores de la tabla. Es decir, su valor en la tabla anterior es el resultante de sumar a la potencia del transceptor de la BTS la ganancia de la antena y de restar todas las pérdidas asociadas hasta ese punto. Éstas son las relativas al combinador, duplexor, conectores, cables y divisor de potencia.

A partir de ahí se procede a calcular la atenuación compensable.

$$\text{Atenuación compensable} = \text{PIRE}_{\text{BTS}} - \text{Sensib}_{\text{MS}} + G_{\text{MS}} + G_{\text{H}} + \text{Márgenes} \quad [24]$$

En este caso la atenuación compensable es 129,9 dB, valor que se obtiene de hacer la siguiente operación:

$$\text{At}_{\text{compensable}} (\text{dB}) = 53,3 - (-85) + 0 + 4 - 3 (\text{margen seguridad}) - 9,4 (\text{margen log-normal})$$

Se procede de igual modo para el enlace ascendente.

- Enlace Ascendente

Potencia de salida del terminal	39 dBm (8W)
Ganancia de antena del terminal	0 dBi
Ganancia altura antena del terminal	4 dB
PIRE	43 dBm
Sensibilidad en recepción BTS	- 91 dBm
Margen de desvanecimiento	- 9.4 dB
Margen de seguridad	3 dB
Ganancia de antena de polarización cruzada	17 dBi
Ganancia diversidad en recepción	2 dB
Pérdidas en divisor de potencia simétrico	- 3.5 dB
Pérdidas de cable coaxial y conectores	- 3 dB
Pérdidas de duplexor	-2 dB
Atenuación compensable	132.1 dB

Tabla 8: Cálculo balance, enlace ascendente

La PIRE se calcula igual que en el apartado anterior. La fórmula de la atenuación compensable para el enlace descendente será la que sigue:

$$\text{Atenuación compensable} = \text{PIRE}_{\text{MS}} - \text{Sensib}_{\text{BTS}} + G_{\text{BTS}} + G_{\text{Diversidad}} - \alpha + \text{Márgenes} \quad [24]$$

En este caso la atenuación compensable es 132,1 dB, valor que se obtiene de hacer la siguiente operación:

$At_{\text{compensable}} \text{ (dB)} = 43 - (-91) + 17 + 2 - (3,5+3+2) - 3 - 9,4;$

Siendo $\alpha = 3,5+3+2$ las pérdidas de cables, conectores, etc. Y 3 y 9,4 los márgenes ya calculados.

* CONCLUSIÓN:

Se puede comprobar que las pérdidas máximas de ambos enlaces son aproximadamente iguales en ambas direcciones, significando esto que los enlaces están balanceados y por lo tanto los móviles podrán ser escuchados por la estación base en todo el área de cobertura de la misma y viceversa.

3.6.1 CONCLUSIÓN FINAL:

RESULTADO DE LA PLANIFICACIÓN RADIOELÉCTRICA

La planificación radioeléctrica resultante para la línea Madrid-Ávila es la que se muestra en la siguiente tabla.

COD BTS	SECTOR	X_UTM	Y_UTM	AZIMUT	ANCHO HAZ	ALTURA	TIPO ANTENA	PK
BTS01	Sureste	442288.9	4481599.9	135	65	15	X65	1,00
BTS01	Noroeste	442438.6	4481468.7	315	30	5	C30	1,00
BTS02	Este	434642.2	4483106.9	75	65	20	X65	8.72
BTS02	Oeste	434642.2	4483106.9	255	65	20	X65	8.72
BTS03	Este	427065.6	4483883.8	85	65	20	X65	16.4
BTS03	Oeste	427065.6	4483883.8	265	30	5	C30	16.4
BTS04	Este	416673.8	4484506.2	290	65	30	X65	26.82
BTS04	Oeste	416673.8	4484506.2	110	65	30	X65	26.82
BTS05	Este	407671.4	4484941.1	90	30	40	X30	35.93
BTS05	Oeste	407671.4	4484941.1	270	30	40	X30	35.93
BTS06	Este	398334.4	4485691.1	290	65	20	X65	45.31
BTS06	Oeste	398334.4	4485691.1	110	30	5	C30	45.31
BTS07	Este	392633.4	4487841.9	125	65	20	X65	51.58
BTS07	Oeste	392633.4	4487841.9	305	30	5	C30	51.58
BTS08	Este	384918.0	4490059.4	130	65	20	X65	59.68
BTS08	Oeste	384918.0	4490059.4	310	65	20	X65	59.68
BTS09	Este	375784.6	4492776.5	115	65	30	X65	69.41
BTS09	Oeste	375784.6	4492776.5	295	65	30	X65	69.41
BTS10	Este	369190.1	4495942.7	135	30	40	X30	76.65
BTS10	Oeste	369190.1	4495942.7	315	30	40	X30	76.65
BTS11	Este	362122.1	4499884.5	110	65	30	X65	84.73
BTS11	Oeste	362122.1	4499884.5	290	65	30	X65	84.73

Tabla 9: Tabla planificación BTS

En este apartado se detalla la solución adoptada para las zonas que no son posibles cubrir desde las BTS's ubicadas en espacio abierto. En este proyecto se dará cobertura en túneles mediante repetidores, de modo que NO se instalarán BTS's en el interior de los mismos.

3.7.1. LIMITACIONES IMPUESTAS POR EL SISTEMA

➤ Avance temporal (Timing Advance)

En las redes que utilizan TDMA como método de acceso al medio, cada usuario debe transmitir periódicamente durante un intervalo de tiempo (*time slot*) que le ha asignado previamente la BTS. Debido a esta multiplexación en tiempo, la BTS recibe señales muy próximas temporalmente entre sí de diferentes terminales, por lo cual, es necesaria una precisa sincronización (para evitar las colisiones entre las ráfagas de bits que llegan.)

El problema surge en el enlace ascendente, que es TDMA. EL enlace descendente no plantea problemas de colisiones ya que funciona en modo multidifusión y cada MS extraerá sus ráfagas de la trama común difundida por la BTS, sin afectar a las demás estaciones móviles.

La comunicación entre MS y BS se realiza mediante la transmisión de ráfagas de información:

RÁFAGA DE ACCESO (Access Burst)					
TB	SINCRONIZACIÓN	DATOS	TB	TIEMPO DE GUARDA	
8	41	36	3	68.25	

RÁFAGA NORMAL (Normal Burst)					
TB	DATOS	FORMACIÓN	DATOS	TB	TIEMPO DE GUARDA
8	58	26	58	3	8.25

Figura 11: Estructura de dos de los tipos de ráfagas de transmisión.

Es esencial que la parte de la ráfaga que contiene los datos (información útil) no sobrepase el *time slot*, puesto que en ese caso se produciría colisión entre datos de distintos terminales y se perderían ambos paquetes. Con el fin de cubrir pequeños retardos, se introduce al final de cada paquete un período de tiempo sin información, llamado intervalo de guarda, que sí puede llegar fuera de los límites del *slot* correspondiente, sin pérdida de datos. Sin embargo, a veces este margen no es suficiente, ya que el tiempo de propagación de la señal varía en función de la distancia entre el terminal y la BTS provocando un retardo mayor o menor.

La siguiente figura muestra las tres posibles situaciones que se pueden dar: recepción perfecta, recepción con un retraso tolerable y recepción errónea debido al retraso.



Figura 12: Ejemplo temporal de la llegada de varias ráfagas.

Para resolver el problema del retardo de propagación y obtener un buen aprovechamiento del espectro, es necesario un mecanismo de compensación en el terminal. Éste debe ser capaz de avanzar su tiempo de transmisión mediante un tiempo conocido como *time advance*.

El proceso a seguir para determinar el tiempo de propagación inicial debido a la distancia entre el terminal y la BTS es el siguiente:

1. El terminal manda una ráfaga de acceso (*access burst*) a la estación base.
2. La estación reconoce el terminal y le asigna un time slot disponible para que pueda transmitir.
3. El terminal se sincroniza con la BTS y manda otra *access burst* de confirmación durante el time slot asignado por la BTS.
4. La BTS calcula el tiempo de propagación cogiendo la diferencia temporal que existe entre el instante en que debería recibir la ráfaga y el instante en el que realmente la recibe.
5. La BTS envía a cada terminal un parámetro TA (*time advance*) acorde al tiempo calculado. Cada terminal avanza su tiempo de transmisión para que su señal llegue a la BTS totalmente sincronizada, compensando el retardo de propagación. Una vez establecida la conexión, como la posición del terminal puede variar, la BS mide continuamente el tiempo de retardo y el terminal actualiza el parámetro TA con el valor adecuado en cada momento.

En GSM, el retardo máximo permitido de las señales entre una estación base y una estación móvil es, según especificaciones, 116,5 μ s, que se corresponde con una distancia máxima de 35 Km vía radio y 23 Km vía fibra óptica. (Retardo en fibra óptica = 5 μ s/Km y retardo interfaz aire = 3,3 μ s/Km). En el presente proyecto, las distancias máximas consideradas entre BTS's o entre BTS's 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 (*Time dispersion*)**

Según las especificaciones GSM, los receptores deben ser capaces de funcionar con los niveles de recepción mínimos especificados con una dispersión temporal de hasta 16 μ s. La propagación en túneles da lugar a retardos muy inferiores a este valor, por lo tanto no existirán problemas. Sin embargo, esta limitación debe tenerse en cuenta en el caso de cobertura mediante repetidor.

El repetidor actúa como un dispersor artificial de la señal existente en el exterior. Aparece un retardo entre la señal transmitida por la estación base y por el repetidor, que tiene dos componentes: retardo de propagación entre ambos, por radio, fibra, y retardo de procesado en el repetidor y por lo tanto es posible que en alguna zona estén presentes dos señales: la señal procedente de la BTS y la procedente del repetidor, con niveles de potencia similares y retardos de algunos μ s.

Debido a esto, se debe asegurar que las señales con retardo superior a 16 μ 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 establecer en 9 dB, que es la relación de protección interferencia cocanal (C/ I) en GSM, como ya se ha mencionado en apartados anteriores.

En el caso de que la diferencia entre potencias sea mayor, la señal más débil no afectará en la recepción y el retardo entre señales es ignorado. Todos los repetidores estarán dotados de un atenuador variable para configurar el equipo de forma que no se produzca interferencia por dispersión de retardo.

Por lo tanto, sabemos que si se cumplen estas dos condiciones, (que el retardo entre señales sea superior a 16 μ s y que la diferencia de potencia entre ambas señales sea inferior a 9 dB), aparecerán problemas de dispersión por retardo. Para evitarlo hay que ser cauteloso a la hora de establecer la ubicación de las BTS y los repetidores, y no superar las distancias máximas permitidas entre ellos -las cuales se calcularán a continuación- o bien estudiar otras alternativas.

Para calcular las distancias máximas asociadas al retardo de dispersión se distinguen dos casos, los cuales se explicarán a continuación:

- i) Retardo de dispersión entre estación base y repetidor
- ii) Retardo de dispersión entre repetidores

i) Retardo de dispersión entre estación base y repetidor:

(Señales recibidas simultáneamente desde la estación base y el repetidor)

La estación móvil recibe dos señales a la misma frecuencia, una proveniente de la estación base con el retardo producido por la propagación de la onda, y otra del repetidor con un retardo mayor, producido por la propagación de la señal óptica desde la estación base al repetidor, el tiempo de procesamiento del repetidor y la BMU y la propagación vía radio desde el repetidor hasta el móvil.

La distancia máxima en función de la dispersión de retardo se calcularía mediante:

$$D_t = (L+L_t) D_f + D_r + (L+L_t - L_p) D_a - L_p \cdot D_a = 16$$

Donde:

- L: Distancia desde la estación base a entrada del túnel
- L_p : Distancia desde la estación base al punto crítico de dispersión de retardo
- L_t : Distancia desde la entrada del túnel al repetidor
- D_f : Retardo en fibra óptica (5 μ s por km)
- D_a : Retardo en el interfaz aire (3.3 μ s por km)
- D_r : Retardo introducido por el repetidor (5 μ s)

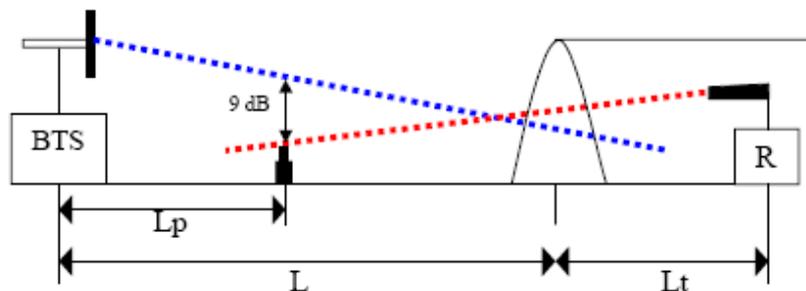


Figura 14: Distancia máxima nominal entre BTS y FOR

Como conclusión se extrae que la distancia máxima nominal que puede existir entre BTS y repetidor debe ser 1300 metros. Si se supera esta distancia, es muy probable que aparezcan problemas de dispersión temporal.

ii) Retardo de dispersión entre repetidores

(Señales recibidas simultáneamente desde dos repetidores)

En este segundo caso, la estación móvil recibe dos señales a la misma frecuencia provenientes de dos repetidores dependientes de la misma estación base, que además están emitiendo a la misma potencia.

El retardo de ambas señales viene expresado de la siguiente forma:

$$Dt = L \cdot Df + Dr + (L - Lp) Da - Dr - Lp \cdot Da = 16$$

Donde:

L_p Distancia desde el repetidor al punto crítico de dispersión de retardo

L Distancia entre repetidores

Df Retardo en fibra óptica ($5 \mu s$ por km)

Da Retardo en el interfaz aire ($3.3 \mu s$ por km)

Dr Retraso introducido por el repetidor ($5 \mu s$)

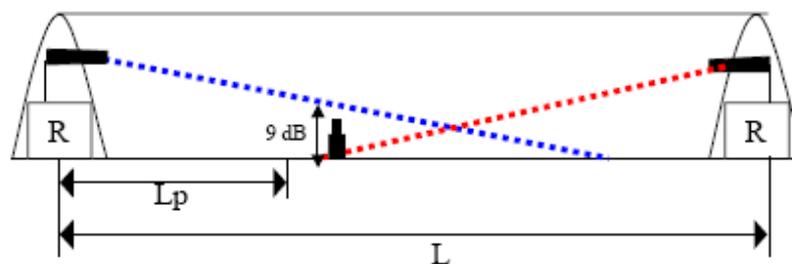


Figura 15. Distancia máxima nominal entre FOR y FOR

La conclusión extraída de este apartado es que la distancia de separación máxima entre dos repetidores que garantiza que no exista un punto crítico es 1.92 Km.

3.7.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES

La solución de cobertura en túneles está basada en estaciones base y repetidores de fibra óptica. Como ya se ha explicado respecto a estos últimos, la señal es proporcionada por el repetidor conectado por medio de fibra óptica a una unidad maestra repetidora, BMU, la cual a su vez está conectada a la estación base dependiente.

Este tipo de solución aporta las siguientes ventajas:

- Asegura el nivel de señal en el repetidor para mayores distancias, ya que no es necesaria visión directa entre la estación base y el repetidor, al estar éste conectado por fibra óptica
- Provee un sistema de distribución por medio de fibra óptica donde es posible conectar varios repetidores dependientes de la misma estación base.

En contrapartida, la transmisión por fibra introduce un retardo mayor que la transmisión por radio, tanto por los conversores mencionados como por la menor velocidad de propagación en la fibra. Este retardo debe estar comprendido dentro de los márgenes establecidos en el apartado de dispersión temporal (3.7.1)

3.7.3. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPAMIENTO EN TÚNELES

➤ Sistema de repetidores de fibra óptica

El sistema de repetidores de fibra óptica consiste básicamente en:

- Unidad Maestra Repetidora (BMU): es el equipo conectado a la BTS y ubicado junto a la misma utilizado para convertir la señal RF de ésta en señal óptica y transmitirla por el sistema de distribución de fibra óptica hasta el repetidor correspondiente.
- Sistema de distribución de fibra óptica: formada por la red de cables de fibra óptica que unen la BMU con cada uno de los repetidores dependientes.
- Repetidor: es el equipo que recibe la señal óptica de la BTS y la convierte en señal RF con un nivel adecuado para transmitirla hacia las estaciones móviles. Se emplearán repetidores de canal selectivo en la banda GSM-R. El repetidor debe proporcionar un mínimo de 2 W de potencia de salida, según requerimientos de EIRENE, sin embargo, el gestor nacional emplea los de 8 W.

En cuanto a la topología de la red se contemplan dos opciones: en estrella y en bus (o cadena). La segunda opción, en bus, se establecería empleando una única fibra que sirva tanto para transmisión como recepción, los distintos repetidores pertenecientes a la misma cadena van multiplexados en la misma fibra. En cada repetidor, antes de entregar la señal óptica de la fibra, se insertaría un divisor que dejaría pasar parte de la señal al repetidor y el resto a los repetidores siguientes en la cadena. De esta manera, es independiente el funcionamiento de un repetidor con el del resto de la cadena, por lo que si uno intermedio dejara de funcionar no afectaría al resto de la cadena. Sin embargo esta topología no asegura el funcionamiento ante una posible rotura de la única fibra utilizada. De modo que se optará finalmente por una configuración en estrella, la cual ofrece aún una mayor robustez frente a posibles fallos. De este modo se instalará llevando a cada repetidor una fibra desde la BMU, de modo que la probabilidad de fallo se reduce, a pesar de que el coste incrementa.

➤ **Sistema radiante**

La configuración básica en interior de túnel del sistema radiante consiste en un transceptor que alimenta dos antenas helicoidales, de polarización circular, mediante un único divisor de potencia para los repetidores ubicados en el interior del túnel.

Como se ha visto en apartados anteriores, parte del túnel quedará cubierto por una BTS situada en la boca del mismo, con una de sus antenas orientada hacia el interior del túnel a una altura adecuada (unos 5 metros aproximadamente). La antena para el citado sector de la BTS será también de polarización circular.

Se emplearán las antenas de polarización circular con un ancho de haz de 28°, con una ganancia de 15 dB y una ratio *Front-Back* mayor de 20 dB.

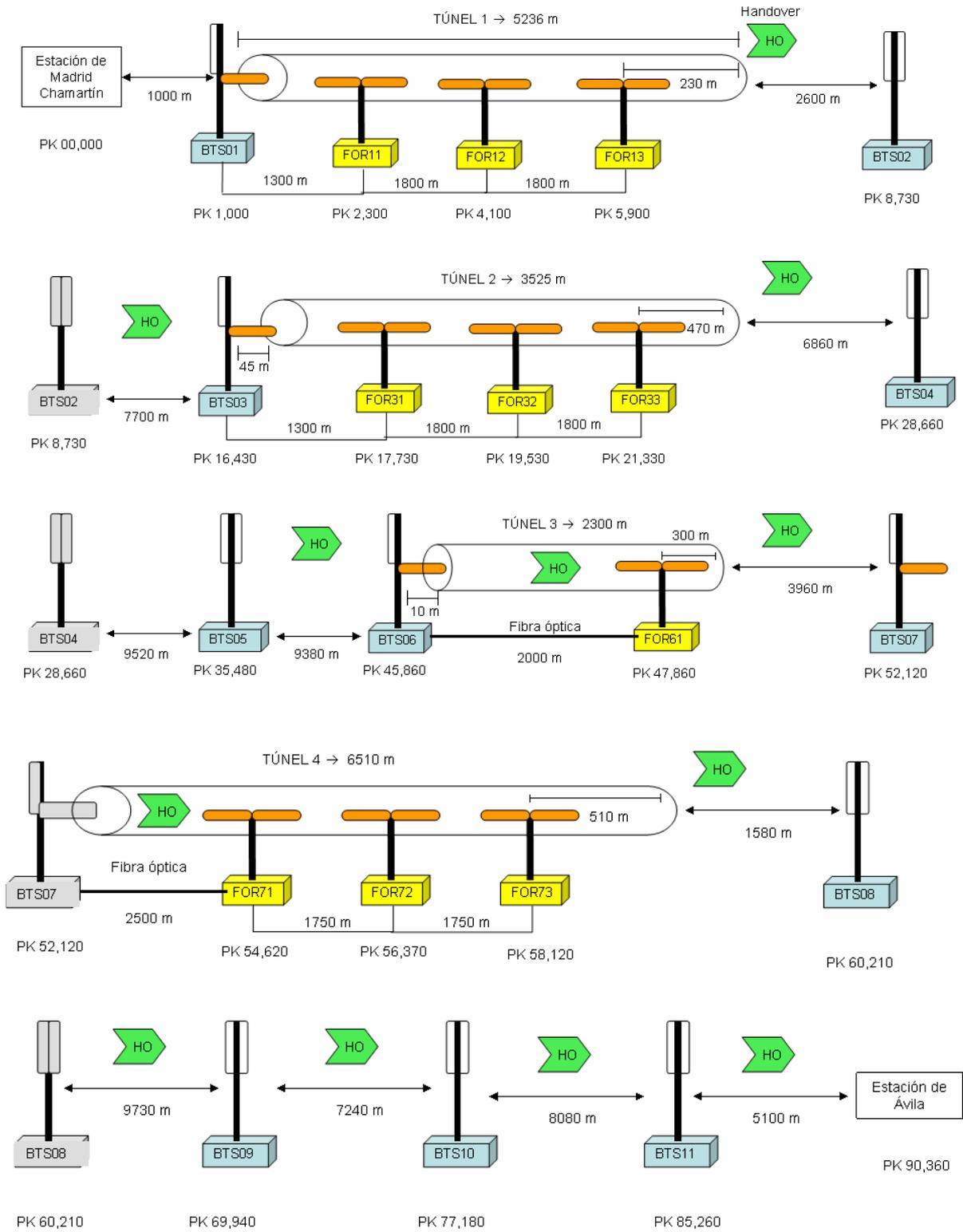


Figura 16: Solución final planificada

CAPÍTULO 4:

PLAN DE ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

4.1 ESPECTRO DE FRECUENCIAS

4.2 CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN DE FRECUENCIAS

4.2.1 REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE SERVICIO

4.3 PATRÓN DE FRECUENCIAS

4.3.1 PLAN PARA ESTACIONES

4.4 LISTA DE CELDAS VECINAS

CAPÍTULO 4: PLAN DE ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

El objetivo de este capítulo será establecer el plan de frecuencias de modo que queden cubiertos los requerimientos de calidad y de tráfico especificados en los capítulos 3 y 5 respectivamente, soportando los servicios previstos para este sistema. Se pretende:

- Minimizar las interferencias, imprescindible para lograr los requerimientos de calidad y servicio especificados.
- Maximizar la capacidad mediante la reutilización de frecuencias y con la restricción de los 19 canales disponibles.

4.1 Espectro 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 como la banda de frecuencia para las redes móviles privadas del UIC. En 1995 el ETSI reservó las dos bandas de frecuencias 876-880 MHz -banda ascendente- y 921-925 MHz -banda descendente-, para el uso ferroviario en toda Europa.

En la siguiente figura se observa un gráfico de las bandas usadas por el sistema GSM-R:

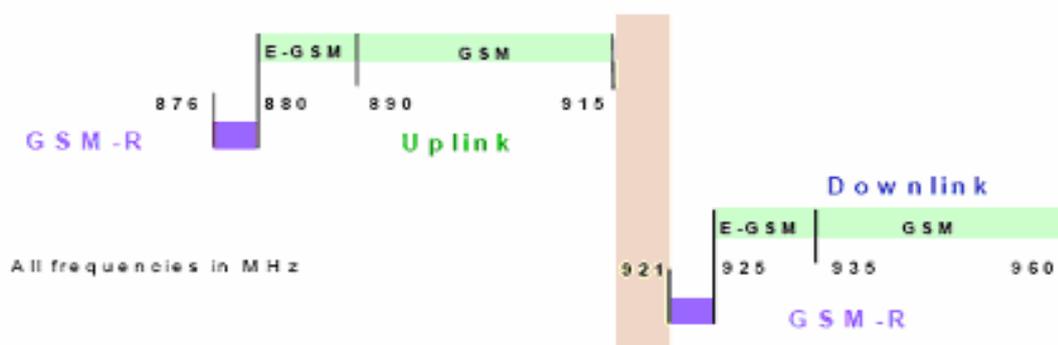


Figura 17: Representación gráfica de la banda de frecuencias reservadas para GSM-R (en morado)

Este ancho de banda de 4 MHz permite un máximo de 19 portadoras (19 canales) -números 955 a 973- como muestran las figuras 17 y 18, espaciadas 200 KHz. Por lo tanto, las frecuencias de las portadoras en el enlace ascendente van de 876 MHz a 880 MHz, mientras que en el enlace descendente se distribuyen desde 921 MHz hasta 925 MHz. Esta estructura proporciona un sistema dúplex por división de frecuencia, con 45 MHz de separación entre las dos sub-bandas.

Cada una de las portadoras lleva ocho canales de voz y datos (en realidad son siete canales + uno reservado para la señalización).

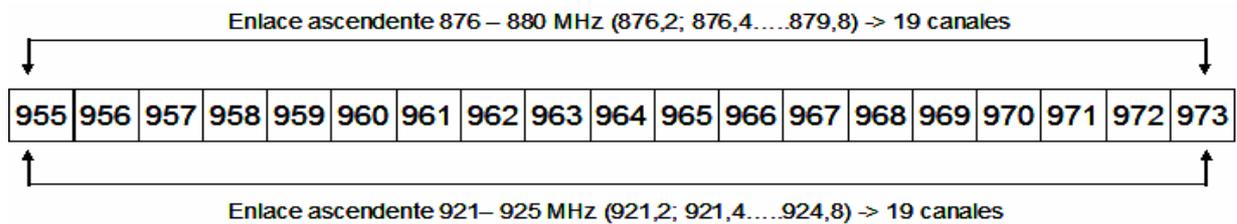


Figura 18: Numeración de canales para la banda de GSM-R

Debido a las características de la modulación GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) utilizada en el sistema GSM-R, la separación entre portadoras utilizadas por celdas vecinas deberá ser, como mínimo, de 400 KHz. Es decir, se usarán canales alternos, por ejemplo, una celda sirviendo en el canal 960, y la celda vecina en el 962. De este modo se evitará la interferencia por canal adyacente.

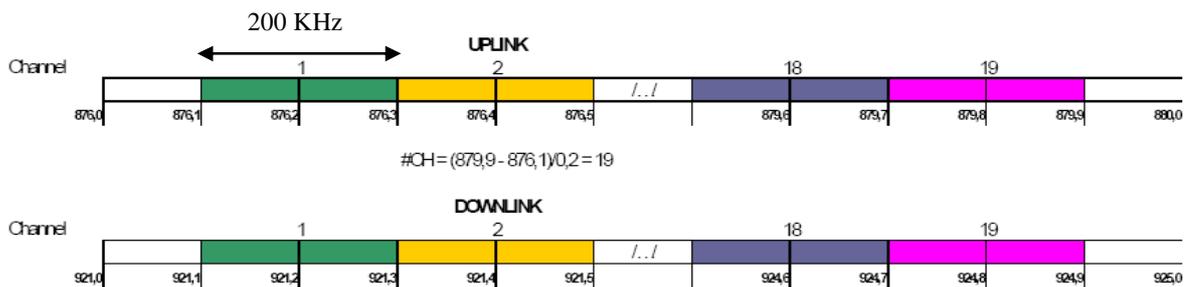


Figura 19: Representación de las 19 portadoras en las dos sub-bandas (cada color es un canal)

➤ **Equivalencia entre frecuencias y canales:**

La portadora de frecuencia se designa con el ARFCN (*Absolute Radio Frequency Channel Number*), comúnmente llamado ‘canal’ (canal físico). La conversión entre canales y frecuencias viene dada por la siguiente relación:

$$\begin{aligned}
 F_d(n) &= 890 + 0.2*(n-1024); & 955 \leq n \leq 973 \\
 F_u(n) &= F_d(n) + 45; & 955 \leq n \leq 973
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Donde $F_u(n)$ y $F_d(n)$ corresponden a las frecuencias en MHz de los enlaces ascendente y descendente respectivamente.

El plan de frecuencias vendrá expresado en canales mediante esa relación, y por lo tanto, cuando se haga referencia al canal $n = 957$, por ejemplo, nos referiremos a las frecuencias 876.6 MHz para el enlace ascendente y 921.6 MHz para el enlace descendente. (Ver figura 18).

4.2 Criterios de planificación de frecuencias

A la hora de definir los criterios de planificación de frecuencias se deben tener muy presentes los requerimientos de calidad de servicio y de tráfico demandados.

4.2.1. REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE SERVICIO

Se define interferencia como el efecto que provoca una señal (interferente), más o menos próxima en el espectro, 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 imposible mantener la comunicación.

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, BER.

Como ya se mencionó con anterioridad, se debe optimizar la reutilización de frecuencias. Sin embargo, la reutilización presenta 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-signal interferente.

Se distinguen los siguientes tipos de interferencias:

- Cocanal: producida por emisiones en la misma frecuencia que la celda servidora.
- Adyacente: producida cuando la separación entre la celda servidora y la interferente es de un canal, es decir, 200 KHz.
- Segunda adyacente: en este caso hay una separación de dos canales, es decir, 400 KHz.
- Tercera adyacente: en este caso hay una separación de tres canales, es decir, 600 KHz.

En la práctica, sólo las dos primeras son relevantes. Por otro lado, hay que tener en cuenta que tanto la señal interferente como la deseada podrían estar afectadas por desvanecimientos, por lo que, a la hora de planificar, se debe tener en cuenta y asegurarse de que los márgenes que se aplican son los adecuados.

La especificación técnica 3GPP 05.05 V8.8.0 (2001-01) “Radio Access Network; Radio transmission and reception” establece una recomendación sobre los niveles de referencia para la relación portadora interferente, distinguiendo entre interferencia cocanal e interferencia por canal adyacente. Esta recomendación es:

- $C / I_{\text{cocanal}} \rightarrow 9 \text{ dB}$
- $C / I_{\text{adyacente}} \rightarrow -9 \text{ dB}$ [1]

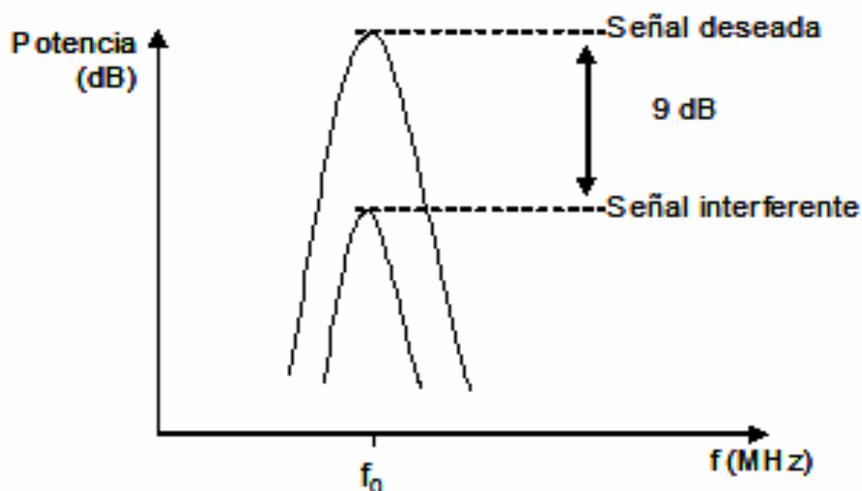


Figura 20: Interferencia cocanal. La señal interferente máxima admisible está 9 dB por debajo de la señal deseada. Adaptación de [1].

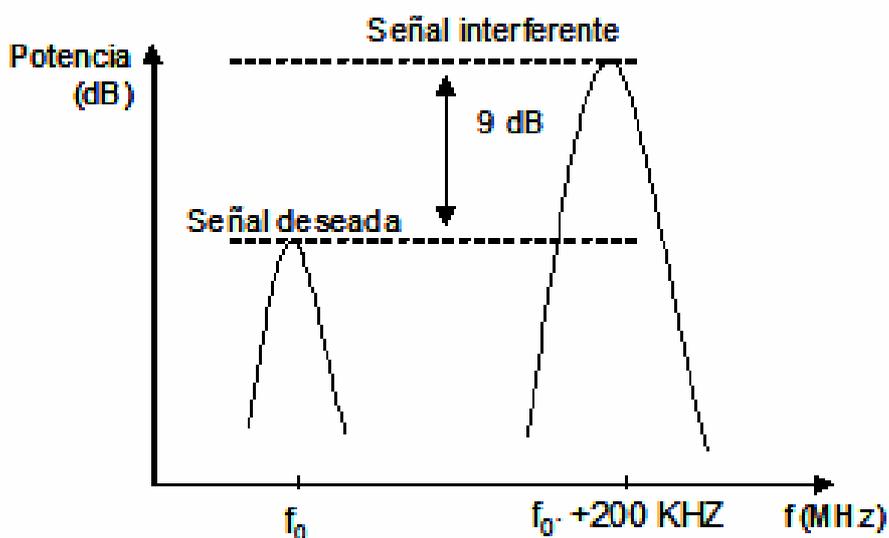


Figura 21: Interferencia canal adyacente. Interferencia máxima admisible para el primer canal adyacente, (separado 200 KHz). Señal interferente máximo 9 dB superior a la señal deseada. Adaptación de [1].

Sin embargo, para obtener una buena calidad de la comunicación es recomendable una relación $C/I > 15$ dB, valor recomendado por EIRENE para sistemas GSM-R, que introduce $15-9 = 6$ dB de margen.

Para estudiar el efecto de las interferencias conviene separar las de origen cocanal de las producidas por canales adyacentes.

$$C / I_{\text{total}} \Rightarrow C / I_{\text{cocanal}} + k \cdot C / I_{\text{adyacente}}$$

C : portadora

I : señal interferente

A la vista de la fórmula anterior se comprueba que para cumplir el requisito de $C/I > 15$ dB, en el caso de que tengamos interferencia cocanal, ésta debe estar como mínimo 15 dB por debajo del nivel de la portadora. Para ello, el plan de frecuencias deberá tener en cuenta una separación mínima de un canal entre la celda transmisora y las celdas adyacentes.

En cuanto a las interferencias de canal adyacente, se considerará una separación mínima de un canal libre entre la celda transmisora y las celdas adyacentes. De esta manera, considerando el nivel de interferencia de referencia recomendado para canal adyacente, y el margen de mejora de 6 dB aplicado para la C/I, se establecerá un nivel de referencia mínimo de -3 dB para las interferencias por canal adyacente.

Así pues, teniendo en cuenta el margen de mejora, para cumplir el requerimiento $C/I > 15$ dB, y con las separaciones mínimas entre canales indicadas, se deberá garantizar que:

- $C / I_{\text{cocanal}} > 15$ dB
- $C / I_{\text{adyacente}} > -3$ dB

* **Conclusión:**

En base a la experiencia en proyectos similares, en los cuales se ha hecho uso de la ya mencionada herramienta de simulación, se sabe que estos requisitos de nivel de potencia se cumplen teniendo en cuenta los siguientes criterios en la asignación de canales:

- Separación mínima de un canal entre canales de una misma celda para evitar interferencia cocanal.
- Separación mínima de un canal entre canales de celdas adyacentes para evitar la interferencia adyacente.

* Fallo de un transceptor

En caso de fallo de un transceptor de una estación base, se debería activar el transceptor de reserva. La frecuencia de trabajo de dicho transceptor deberá ser la misma que la del transceptor que ha quedado fuera de servicio. De esta forma, el plan de frecuencias continúa siendo robusto frente a interferencias, ya que se mantendrían la lista de vecindad y las restricciones del plan de frecuencias respecto a la separación de canales necesaria.

4.3 Patrón de frecuencias

Se ha diseñado un patrón de repetición de frecuencias que facilite la planificación de las mismas. Esto consiste en una secuencia de frecuencias, con la separación entre sí especificada anteriormente, que se va asignando a celdas consecutivas a lo largo del trazado.

Un patrón de reutilización válido sería por ejemplo el siguiente:

Grupo	Frecuencia (MHz)
A	956
B	958
C	960
D	962
E	964
F	966
G	968
H	970
I	972

Tabla 12: Patrón reutilización de frecuencias

Utilizando sólo los ARFCN pares de la banda disponible se evita la interferencia de canales adyacentes, al estar empleando canales alternos, como se explicaba en los requisitos. Pero se podrían emplear igualmente los impares por ejemplo. Sin embargo, dada la existencia de pocas BTS's en el presente proyecto, y puesto que existen más que suficientes frecuencias disponibles, se empleará el siguiente esquema para una mayor calidad en el servicio:



Figura 22: Esquema repetición frecuencias

En la figura 22 se comprueba que el patrón se repite cada nueve emplazamientos, con lo que se consigue que dos celdas transmitiendo a la misma frecuencia estén suficientemente separadas y por tanto se reduzca la posibilidad de interferencia cocanal. Considerando una distancia media de 8 km entre BTS's, se obtiene una distancia media de reutilización de unos 72 km.

4.3.1. PLAN PARA ESTACIONES

Tanto para evitar problemas de dispersión temporal como por razones de capacidad, hay varias BTS en el proyecto que van a tener más de un transmisor activo, como se puede observar en la siguiente tabla del plan de frecuencias.

El plan de frecuencias, así como el número de transmisores activos por BTS propuesto para el presente proyecto es el que se presenta en la siguiente tabla:

BTS	Nº Tx	Nº celdas	Celda	ARFN
BTS01	2	1	C1	A y C (956 y 960)
BTS02	1	1	C2	E (964)
BTS03	1	1	C3	G (968)
BTS04	1	1	C4	I (972)
BTS05	1	1	C5	B (958)
BTS06	2	2	C6 y C7	D y F (962 y 966)
BTS07	2	2	C8 y C9	H y A (970 y 956)
BTS08	1	1	C10	C (960)
BTS09	1	1	C11	E (964)
BTS10	1	1	C12	G (968)
BTS11	2	1	C13	I y A (972 y 956)

Tabla 13: Plan de frecuencias para las BTS's

En esta tabla, los repetidores que dependen de cada BTS aparecen ya reflejados junto a su BTS.

En todo sistema de comunicación radio se exige una continuidad, tanto de cobertura como de servicio. En cada momento, una determinada celda es la que gestiona una llamada, pero cuando la cobertura de esa celda disminuye, se hace necesario el traspaso de esa llamada a otra celda para que no se produzca una caída de la llamada en curso. Para ello se necesita establecer una lista de celdas vecinas que defina, para cada celda, otras celdas vecinas que serán las únicas autorizadas para continuar con las llamadas en curso.

En el sistema GSM-R, la lista de celdas vecinas definida para cada celda debe ser corta, en el sentido de que sólo serán incluidas en dicha lista las celdas adyacentes, ya que son las que más claramente solapan sus coberturas y, por supuesto, sólo se pueden realizar *handovers* entre celdas que superponen coberturas.

En la tabla siguiente se puede ver la lista de celdas vecinas definidas para el presente proyecto:

Celda	Celdas vecinas
C1	C2
C2	C1 y C3
C3	C2 y C4
C4	C3 y C5
C5	C4 y C6
C6	C5 y C7
C7	C6 y C8
C8	C7 y C9
C9	C8 y C10
C10	C9 y C11
C11	C10 y C12
C12	C11 y C13
C13	C12

Tabla 14: Lista de vecindades

CAPÍTULO 5:

ESTUDIO DE TRÁFICO

5.1 MODELO DE TRÁFICO

- 5.1.1 PROBABILIDAD DE BLOQUEO
- 5.1.2 CLASIFICACIÓN DEL TRÁFICO
- 5.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LTRÁFICO

5.2 ESTIMACIÓN DEL TRÁFICO

- 5.2.1 TRÁFICO EN UNA CELDA TIPO
- 5.1.2 TRÁFICO EN UNA CELDA URBANA

5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SUBSISTEMA RADIO

- 5.3.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA INTERFAZ AIRE (Um)
- 5.3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA INTERFAZ Abis (BTS-BSC)
- 5.3.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA INTERFAZ Asub (BSC-TRAU)
- 5.3.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA INTERFAZ A (BSC-MSC)
- 5.3.5 CONTROLADORA DE ESTACIONES BASE, BSC
- 5.3.6 TRAU, UNIDAD DE TRANSCODIFICACIÓN Y ADAPTACIÓN DE VELOCIDADES

CAPÍTULO 5: ESTUDIO DEL TRÁFICO

En este capítulo se realizará un estudio del modelo de tráfico en el que se analizará, en primer lugar, el tipo de comunicaciones que tienen lugar en una red GSM-R para posteriormente, realizar el cálculo del tráfico generado en la red en función de los intentos de llamada, duración media de las mismas y número de usuarios.

Para la estimación del tráfico originado en el sistema, los diferentes usuarios de la red GSM-R se clasifican según el tipo de tráfico que generan, voz y/o datos, y la clase de servicios que pueden utilizar. Los usuarios de la red GSM-R se pueden dividir en varios grupos: trenes, maquinistas, personal de mantenimiento, de seguridad.

5.1 **Modelo de Tráfico**

5.1.1. PROBABILIDAD DE BLOQUEO

GSM-R es un sistema con pérdidas, por lo que una llamada entrante es aceptada solamente si se dispone de recursos libres para cursarla. En el caso de que el sistema no disponga de canales libres para aceptarla, la llamada entrante se pierde. De modo que la probabilidad de bloqueo se define como la probabilidad de que una llamada entrante no pueda ser cursada y se pierda.

El dimensionamiento del número de canales en cada una de las interfaces estará determinado por la cantidad de tráfico de la interfaz y su probabilidad de bloqueo.

Este tipo de sistemas se modela mediante la fórmula de Erlang-B. Esta fórmula nos indica el tráfico máximo que podrá cursar el sistema, dependiendo del número de canales disponibles y de la probabilidad de bloqueo requerido.

La definición de la fórmula de Erlang-B es la siguiente:

$$P_b = \frac{\frac{\rho^N}{N!}}{\sum_{k=0}^N \frac{\rho^k}{k!}}$$

Donde:

P_b = Probabilidad de bloqueo de llamada

ρ = Tráfico en Erlangs

N = Número de canales

Siguiendo las recomendaciones de EIRENE y MORANE, las probabilidades de bloqueo de las interfaces del sistema deben ser las siguientes:

Interfaz	Probabilidad de Bloqueo
MSC – Otros elementos de red	0,1%
Asub (BSC – TRAU)	0,1%
Aire	1%

Tabla 15 : Probabilidades de bloqueo según interfaz recomendadas por EIRENE - MORANE

5.1.2 CLASIFICACIÓN DEL TRÁFICO

Se diferenciará entre llamadas de voz y tráfico de datos:

1) Llamadas de voz

La red GSM -R soportará los siguientes servicios de voz:

a) Llamadas punto a punto

Se encuentran dentro de esta categoría todas las llamadas de voz que se realizan entre dos terminales móviles, dos fijos o uno móvil y otro fijo.

b) Llamadas de difusión

Estas permitirán una comunicación unidireccional, esto es, de un único usuario hacia múltiples usuarios, en un área de localización concreta.

Cuando la MSC reconoce una llamada de difusión realiza la conexión dúplex con el operador, e inicia las conexiones símplex con cada una de las celdas del área difusión. Si un miembro del grupo entra en el área de difusión, comienza a escuchar el mensaje difundido, y dicha comunicación cesa cuando abandona dicho área

c) Llamadas de grupo

La llamada en grupo se comporta del mismo modo que una llamada de difusión, salvo que en este caso el usuario que está hablando puede cambiar. Es decir, el grupo escucha al usuario que inició la llamada, cuando éste deja de hablar, otro usuario del mismo grupo reservará el canal ascendente para poder comunicarse con el resto del grupo. Los terminales que durante la llamada salgan del área de localización se desconectarán de la llamada y de la misma forma, los que entren se unirán automáticamente a ella.

2) Llamadas de datos:

a) Transmisión de mensajes cortos SMS's

Los mensajes cortos (SMS) son mensajes de texto enviados desde o hacia terminales móviles. El envío de mensajes cortos en la interfaz aire se realizará a través de los canales de señalización GSM-R existentes. Por lo tanto, no necesitan canales de tráfico propiamente dichos.

5.1.3. CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO

Por lo anteriormente citado, para realizar el cálculo de estimación de tráfico se considerará únicamente tráfico de voz. Las estimaciones de tráfico se realizarán en el caso más desfavorable, es decir, en hora cargada.

Los recursos de radio en la interfaz aire (U_m) son independientes entre celdas, por lo que en vez de considerar el número de abonados y el tráfico generado en el trayecto, analizaremos el tráfico máximo previsto (simultaneo) en hora cargada considerando distintos tipos de celda.

5.2 Estimación de Tráfico

Se considerará el número de terminales activos por celda, y se analizará el número de llamadas por usuario y la duración media de las llamadas en la hora cargada. De esta manera, se calcula el tráfico en el caso en el que todos los terminales cubiertos por una celda están activos.

Para el cálculo de tráfico, en Erlangs, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\rho = \lambda * T$$

Donde:

ρ = Tráfico en Erlangs

λ = Intentos de llamadas (en llamadas por segundo)

T = Duración media de las llamadas (en segundos)

Según el tipo de llamada se distingue entre llamadas punto a punto y llamadas punto a multipunto (de grupo y de difusión). Las llamadas punto a multipunto ocupan un canal en cada celda, pero como en la hipótesis de partida se está considerando el tráfico de una sola celda, el tráfico de llamadas punto-multipunto se sumará directamente al tráfico punto a punto para calcular el tráfico total de la celda.

En las siguientes tablas, se resume el tráfico generado en una celda determinada en la hora cargada, detallando los siguientes parámetros:

- Tipo de usuario
- Número de terminales activos por celda
- Tipo de llamada
- Número de llamadas entrantes en la celda
- Duración media de la llamada en segundos
- Tráfico generado en hora cargada por celda, en Erlangs.

En este proyecto se pueden distinguir dos tipos de celdas: la celda en medio rural y la celda en medio urbano. En general, para la celda en medio rural (celda tipo) se sabe que una configuración (1+1) es suficiente para cursar todo el tráfico generado. Para la celda urbana, que serán habitualmente las ubicadas en estaciones, valdrá generalmente con una configuración de (2+1).

A continuación se procederá a justificar y a estudiar las diferentes configuraciones de los distintos tipos de celda, considerando la cantidad de trenes que pueden existir en las inmediaciones de cada celda y el personal en tareas de seguridad, mantenimiento, etc.

5.2.1. TRÁFICO EN UNA CELDA TIPO

Por cada celda, se contará con el número máximo de trenes, considerando el tráfico generado por la concatenación de repetidores como una extensión de aquélla, además de cualquier otro usuario de la red GSM-R. De esta forma, se asumen 2 trenes realizando llamadas por celda.

Esta tabla, facilitada por ADIF (Administrador De Infraestructuras Ferroviarias), representa una síntesis del tráfico cursado por una BTS en una celda tipo. En base a estadísticas estudiadas por el gestor nacional, el mismo ha propuesto el siguiente modelo de tráfico, el cual será utilizado en este proyecto para poder dimensionar las diferentes interfaces.

Usuario	# Canales activos por celda	Tipo de llamada	# Llamadas entrantes en la celda en hora cargada	Duración media de la llamada (seg)	Tráfico por celda en hora cargada (Erlangs)
Cab Radio (Terminal embarcado)	2	Al puesto de mando	2	60	0,07
		A otro terminal	1	120	0,07
		Llam emergencia	0,042	45	0,00
Terminales portátiles personal de estación (GPH)	3	A otro terminal	2	60	0,1
		Llam emergencia	0,042	45	0,00
Terminales portátiles personal de seguridad (GPH)	3	A otro terminal	2	120	0,2
		Llam emergencia	0,083	45	0,00
Terminales de personal de mantenimiento (OPH)	3	A otro terminal	2	120	0,2
		Llam emergencia	0,042	45	0,00
Operaciones de maniobras	1	Llamadas de maniobras	2	600	0,33
Puesto de mando	1	Llamadas entrantes de puesto de mando	2	30	0,02
Llamadas telefonía fija con destino usuario GSM-R en celda	1	Llamadas entrantes telefonía fija	2	120	0,07
Terminales portátiles de personal de estación (GPH)	3	Llamadas de Grupo o Difusión	1	30	0,03
Terminales portátiles personal de seguridad (GPH)	3	Llamadas de Grupo o Difusión	1	45	0,04
Terminales de personal de mantenimiento (OPH)	3	Llamadas de Grupo o Difusión	1	30	0,03
Operaciones de maniobras	3	Llamadas de Grupo o Difusión	1	45	0,04
Puesto de mando	1	Llamadas de Grupo o Difusión	2	30	0,02
TOTAL					1,22

Tabla 16: Tráfico en una celda tipo

Las conclusiones se estudiarán a continuación, el apartado 3.5.1, 'Dimensionamiento de la interfaz aire'.

5.2.2. TRÁFICO EN UNA CELDA URBANA

Usuario	# Canales activos por celda	Tipo de llamada	# Llamadas entrantes en la celda en hora cargada	Duración media de la llamada (seg)	Tráfico por celda en hora cargada (Erlangs)
Cab Radio (Terminal embarcado)	8	Al puesto de mando	2	60	0,27
		A otro terminal	1	120	0,27
		Llam emergencia	0,042	45	0,01
Terminales portátiles personal de estación (GPH)	4	A otro terminal	2	60	0,14
		Llam emergencia	0,042	45	0,00
Terminales portátiles personal de seguridad (GPH)	3	A otro terminal	2	120	0,2
		Llam emergencia	0,083	45	0,01
Terminales de personal de mantenimiento (OPH)	3	A otro terminal	2	120	0,2
		Llam emergencia	0,042	45	0,00
Operaciones de maniobras	3	Llamadas de maniobras	2	600	1
Puesto de mando	1	Llamadas entrantes de puesto de mando	2	30	0,02
Llamadas telefonía fija con destino usuario GSM-R en celda	1	Llamadas entrantes telefonía fija	2	120	0,07
Terminales portátiles de personal de estación (GPH)	3	Llamadas de Grupo o Difusión	1	30	0,03
Terminales portátiles personal de seguridad (GPH)	3	Llamadas de Grupo o Difusión	1	45	0,04
Terminales de personal de mantenimiento (OPH)	3	Llamadas de Grupo o Difusión	1	30	0,03
Operaciones de maniobras	3	Llamadas de Grupo o Difusión	1	45	0,07
Puesto de mando	2	Llamadas de Grupo o Difusión	2	30	0,13
TOTAL					2,53

Tabla 17: Tráfico en una celda urbana

Las conclusiones se estudiarán a continuación, el apartado 3.5.1, ‘Dimensionamiento de la interfaz aire’.

5.3

Diseño del subsistema radio

A continuación se describen las tareas realizadas en el diseño del sistema radio:

- Dimensionamiento de la interfaz aire (Um)
- Dimensionamiento de la interfaz Abis (BTS-BSC)
- La interfaz Asub (BSC-TRAU)
- Dimensionamiento de la interfaz A (TRAU-MSC)
- Diseño de la BSC
- Diseño de la TRAU

5.3.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA INTERFAZ AIRE (Um)

La interfaz entre las BTS's y los terminales móviles bajo su cobertura se denomina interfaz aire o Um. Una portadora ofrece 8 canales, que pueden ser de señalización o de tráfico de voz o datos. El número de canales de señalización depende del número de portadoras instaladas en la estación base.

La siguiente tabla muestra el número de canales de señalización necesarios según el número de portadoras, y el tráfico máximo que puede cursar la celda según la fórmula de Erlang-B considerando una probabilidad de bloqueo del 1%.

# TRX	Canales de tráfico	Canales de señalización	Tráfico máximo (Erlangs)
1	7	1	2,5
2	14	2	7,35
3	21	3	12,83

Tabla 18: Relación transmisores activos, tráfico y canales de tráfico

De la tabla anterior, se aprecia que el tráfico máximo que puede cursar un único transmisor con una probabilidad de bloqueo del 1%, siete canales de tráfico y un canal de señalización es de 2,5 Erlangs. Por lo tanto, un único transmisor es suficiente para soportar el tráfico generado en este tipo de celdas.

*** Conclusión:**

En vista de la tabla 16, en una celda tipo, tendremos un total de tráfico de voz y datos de 1,22 Erlangs. Utilizando una probabilidad de bloqueo del 1%, como determina EIRENE para esta interfaz, y según la tabla de Erlang B, la cual se puede encontrar en el Apéndice B, se concluye que serán necesarios 5 canales para cursar los 1,22 Erlangs. De modo que en estas celdas se utilizará la configuración (1+1) con un transmisor activo, dado que cada transmisor cuenta con siete canales de voz y uno para señalización, más el transmisor de reserva, para asegurar el funcionamiento de la BTS ante la posible caída del transmisor activo.

Sin embargo, para las celdas en entorno urbano (tabla 17), se puede observar que el total es muy superior: 2,53 Erlangs. Según lo visto en la tabla 18, esta cantidad de tráfico ya no puede ser cursada con un solo transmisor activo por celda. Para cursar los 2,53 Erlangs serán necesarios ocho canales de tráfico de voz y datos, de modo que para este tipo de celda se empleará la configuración (2+1), dos transmisores activos y uno de reserva por si se produce la caída de alguno de ellos.

Celda en medio rural → configuración (1+1)
Celda en medio urbano → configuración (2+1)

5.3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA INTERFAZ Abis (BTS-BSC)

Para la construcción del interfaz Abis entre las BTS's y la BSC se optará por una topología en anillo, como se explicará en el capítulo 6, por ofrecer mayor protección ante la caída de cualquier elemento del sistema. Además, la protección y conmutación en el anillo será de forma automática y sin cortar las llamadas en curso en el momento del fallo. Para el transporte se utilizarán los canales E1 proporcionados por el nodo STM-1 de la red fija instalado en cada emplazamiento.

Para calcular el número de estaciones base que se incluirán en cada anillo se considerarán tres transmisores activos por celda con el fin de no modificar la configuración de la red fija en el caso de producirse incrementos de tráfico posteriores. Cada transmisor ocupa 2 *time-slots* del canal E1 en los anillos que unirán las BTS's con la BSC (de 32 *time-slots* en total, 2 reservados para señalización, 30 para transmisión). De modo que se obtiene que el número máximo de BTS's en un anillo será cuatro. Esto se explicará con más detalle en el apartado 6.2.1 del capítulo 6.

En el presente proyecto tenemos un total de 11 BTS's. Atendiendo a lo mencionado, se implementará un total de 3 anillos agrupando las BTS por anillos lógicos según la siguiente tabla:

BTS	# TRX	Anillo	Suma TRX
BTS01	2	A1	5
BTS02	1		
BTS03	1		
BTS04	1	A2	6
BTS05	1		
BTS06	2		
BTS07	2		
BTS08	1	A3	5
BTS09	1		
BTS10	1		
BTS11	2		

Tabla 19: Anillos lógicos planificados. Interfaz Abis

5.3.3 LA INTERFAZ Asub (BSC-TRAU)

La interfaz Asub sostiene el tráfico cursado entre la BSC y la TRAU. Se implementará sobre enlaces PCM30 con subdivisión de los *slots* de tiempo 1:4. De esta forma, podemos decir que la interfaz Asub puede transportar hasta 120 canales de 16 Kbps cada uno. Para estimar el tráfico total, consideraremos el número de estaciones base que hay en la línea, es decir, once.

Algunas consideraciones:

- La probabilidad de bloqueo para la interfaz Asub es del 0,1 %
- Tenemos en total once BTS's en la Línea Madrid-Ávila de las cuales dos son de tipo urbano y el resto, es decir, nueve, de entorno rural.
- El tráfico de voz y datos que el sistema tiene que cursar en total por lo tanto será de:

$$\begin{aligned}
 & 9 \times 1,22 = 10,98 \text{ Erlangs} \\
 & + \underline{2 \times 2,53 = 5,06 \text{ Erlangs}} \\
 & \qquad \qquad \qquad 16,04 \text{ Erlangs}
 \end{aligned}$$

De modo que asumiendo la probabilidad de bloqueo de 0,1% y el tráfico total obtenido en el peor de los casos, esto es, 16,04 Erlangs, concluimos mediante la tabla Erlang-B, que se necesitarán un mínimo 30 canales de 16 kbps para cursar dicha cantidad de tráfico.

Es necesario planificar además un canal para la operación y mantenimiento del subsistema radio así como un canal de señalización LAPD de 64 Kbps para el control de la TRAU, además del correspondiente canal de señalización SS7, existente entre la MSC y la BSC, y un nuevo canal de señalización SS7 para cursar el tráfico correspondiente a los servicios de localización.

LAPD es el protocolo para la conexión de la BSC con las BTS's, y el protocolo CCS7 para la conexión con la central de conmutación a través de la TRAU.

La siguiente tabla resume los canales requeridos en la interfaz A sub:

Tipo de tráfico	Canales
Voz y Datos	10 de 16 Kbps
LAPD	1 de 64 Kbps
O&M	1 de 64 Kbps
CCS7	2 de 64 Kbps
Total	7 canales de 64 Kbps

Tabla 20: Dimensionamiento interfaz A sub

Puesto que cada línea PCM30 soporta 30 canales de 64 Kbps, sin incluir el canal utilizado para sincronización de la línea, el número de líneas PCM30 necesarias en el interfaz A sub será de cómo mínimo 1.

5.3.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA INTERFAZ A (BSC-MSC)

La misión de la TRAU es adaptar los canales de 16 Kbps a canales de 64 Kbps, y viceversa, y transmitirlos a la central de conmutación. Esta interfaz se implementará también sobre enlaces PCM 30, y se deberá dimensionar de forma adecuada el número de enlaces necesarios entre la TRAU y la central de conmutación en función de las necesidades de la Línea.

Considerando el tráfico y el número de canales de tráfico calculados en el anterior apartado, además de los canales necesarios para señalización de canal común y operaciones y mantenimiento, obtenemos en la siguiente tabla el número total de canales a implementar en el interfaz A.

Tipo de tráfico	Canales
Voz y Datos	10 de 64 Kbps
O&M	1 de 64 Kbps
CCS7	2 de 64 Kbps
Total	14 canales de 64 Kbps

Tabla 21: Dimensionamiento interfaz A

Puesto que cada línea PCM 30 soporta 30 canales de 64 Kbps, sin incluir el canal utilizado para sincronización de la línea, y uno que permanecerá sin utilizar, se obtiene que el número de líneas PCM30 necesarias en la interfaz A será como mínimo 1.

3.3.5. CONTROLADORA DE ESTACIONES BASE, BSC

La controladora de estaciones base soporta el protocolo LAPD para la conexión con las BTS's, y el protocolo CCS7 para la conexión con la central de conmutación a través de la TRAU. Su función principal es la de concentrar el tráfico procedente de las estaciones base y controlar los recursos radio de las mismas. Se instalará una BSC en el puesto de mando del gestor nacional.

3.3.6. UNIDAD DE TRANSCODIFICACIÓN Y ADAPTACIÓN DE VELOCIDADES

La TRAU se encargará de la codificación y decodificación de los canales de tráfico de voz y de la adaptación de velocidades de los canales de tráfico de datos. Se instalará una TRAU en el puesto de mando del gestor nacional.

CAPÍTULO 6:

SISTEMA DE TRANSMISIÓN

6.1 BREVE INTRODUCCIÓN

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA RED DE TELECOMUNICACIONES FIJAS

6.2.1 RED DE ACCESO BTS

6.2.2 RED DE ACCESO REPETIDORES

6.2.3 RED DE ACCESO SISTEMAS DE SUPERVISIÓN

CAPÍTULO 6: SISTEMA DE TRANSMISIÓN

En este capítulo se describen los requisitos que debe proporcionar la red de transmisión al sistema de comunicaciones móviles GSM-R para proveer de los servicios de telecomunicaciones necesarios a los emplazamientos de las BTS's y así asegurar los servicios de voz y datos.

Los principales servicios proporcionados por la red de telecomunicaciones fijas son los enlaces tipo E1 establecidos de forma redundante entre las BTS's de un mismo anillo y su BSC.

Esta red de telecomunicaciones que proporciona el acceso empleará la fibra óptica como medio de transmisión. Esta fibra discurrirá a lo largo de la Línea Madrid-Ávila.

La red de acceso, tal y como se detallará posteriormente, posee un diseño de red basado en distintos anillos físicos de fibra que englobarán cada uno de los emplazamientos en donde se instalarán las BTS's. Dicha red, a su vez, se estructura en anillos lógicos sobre los que se implementarán los servicios de telecomunicaciones (enlaces E1).

6.1

Breve introducción

*** SDH**

Acrónimo de jerarquía digital síncrona, (Synchronous Digital Hierachy), es un estándar para redes de telecomunicaciones de alta velocidad y alta capacidad. Es un sistema de transporte digital realizado para proveer una infraestructura de redes más simple, económica y flexible.

*** STM-1**

La trama básica de SDH es el STM-1 (Synchronous Transport Module level 1), con una velocidad de 155 Mbps. Cada trama va encapsulada en un tipo especial de estructura denominado contenedor. Una vez encapsulados se añaden cabeceras de control, después de un proceso de multiplexación, se integra dentro de la estructura STM-1. A partir de esta velocidad básica se pueden obtener velocidades superiores multiplexando a nivel de Byte, obteniendo estructuras STM-4, STM-16 y STM-64.

- La estructura de la trama STM-1

Se compone de 2430 Bytes en serie que representaremos en forma matricial, de 9 filas con 270 Bytes por fila, como se puede observar en la figura 23. La duración de transmisión de cada trama es de 125 μ seg, la cual se corresponde con una frecuencia de 8000 Hz. La transmisión de cada Byte individual es de 64 Kbps.

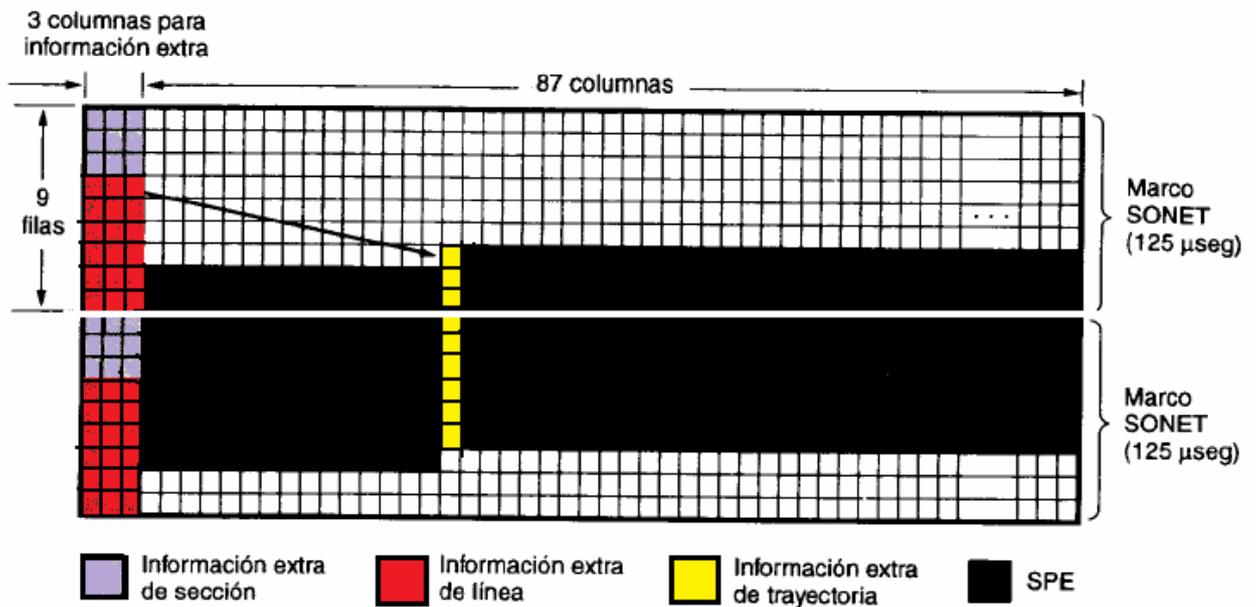


Figura 23: Estructura Trama STM-1. Son dos tramas STM-1 seguidas. [5]

Gracias a la utilización de punteros se puede acceder a cualquier canal de 2 Mbps (E1). A la salida del equipo SDH STM-1 dispondremos de hasta 63 enlaces E1, que como ya sabemos, cada E1 se compone de 32 canales, 30 canales de voz y dos de control.

comunicaciones fijas

6.2.1. RED DE ACCESO BTS

Como ya se ha mencionado, el medio de transmisión empleado será la fibra óptica. La red de acceso estará compuesta por anillos físicos de fibra óptica. Esta topología en anillo proporciona la redundancia de caminos independientes que se precisa. Los anillos físicos se consiguen empleando fibras de los distintos cables de la infraestructura de fibra óptica que discurren a ambos lados de las vías de la Línea. Esta red troncal puede ser de 64, 96 o 124 fibras ópticas.

En definitiva, la topología de red escogida consiste en una malla de 5 anillos físicos, que a continuación se listan:

Anillo 1: BTS 01 y 02

Anillo 2: BTS 03 y 04

Anillo 3: BTS 05 y 06

Anillo 4: BTS 07 y 08

Anillo 5: BTS 09, 10 y 11

El acceso de esta red a cada uno de los emplazamientos de BTS tendrá como interfaz con la red de acceso un repartidor de fibra óptica (ODF) ubicado en el interior de las casetas GSM-R. Desde éste se derivarán los latiguillos de fibra, uniendo dichos ODF's con los equipos de transmisión instalados en los emplazamientos.

A su vez, esta red de acceso estará estructurada en anillos lógicos, como se mencionó con anterioridad en el capítulo 5, sobre los cuales se recogen los servicios de telecomunicaciones proporcionados a las BTS's. Estos servicios son principalmente enlaces tipo E1 (de 2 Mbps) que se establecen entre las BTS's y la BSC. La topología de anillo lógico permite garantizar que cualquier enlace soportado por la red de telecomunicaciones siga operativo en caso de un fallo en el sistema, como puede ser la rotura de un cable de fibra.

La infraestructura incluirá también la conexión por medio de fibra óptica entre las BTS's que incluyan BMU y sus correspondientes repetidores, instalando el repartidor de fibra óptica (ODF) necesario en cada emplazamiento de los repetidores. Por lo tanto a estos ODF's se conectarán los repetidores y la BMU.

Los equipos de transmisión SDH, a los que denominaremos genéricamente nodos (STM), se instalarán en los emplazamientos de GSM-R, así como los repartidores ODF y los repartidores DDF para los flujos de 2Mbps, que será el elemento al cual se conecte la salida de 2 Mbs de la estación base.

* Enlaces E1 entre BTS's y el subsistema BSS

Esta red tiene como objetivo principal proporcionar al sistema GSM-R un servicio de comunicaciones basado en el establecimiento de enlaces E1. Estos enlaces E1 estarán configurados en forma de bucle de forma que los enlaces tengan origen y fin en las BSC's que controlan las BTS's.

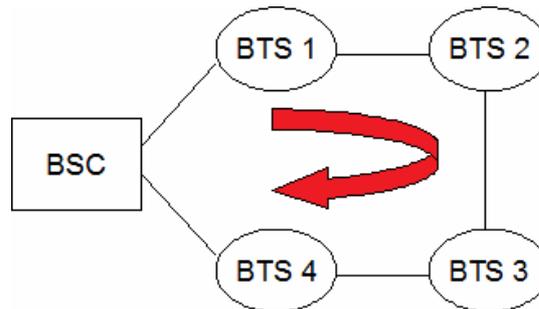


Figura 24: recorrido en bucle del enlace E1 principal entre las BTS's q comparten un enlace

Cada uno de los enlaces E1 soporta la denominada interfaz Abis, de forma que durante el recorrido del enlace E1 es compartido por un máximo de cuatro BTS's para recibir y enviar información a la BSC. Para ello las BTS's de la secuencia comparten un enlace E1 accediendo a varios de los subcanales (1 ... 31) que componen el enlace, tal y como se representa en la figura 26.

A una secuencia de BTS's que comparten un mismo enlace E1, se le denomina anillo lógico.

Para asegurar el funcionamiento de esta red SDH, la red de telecomunicaciones proporcionará otro enlace E1 secundario. Éste recorrerá la secuencia de BTS's en sentido opuesto, dotando así a la red de una mayor robustez ante posibles fallos.

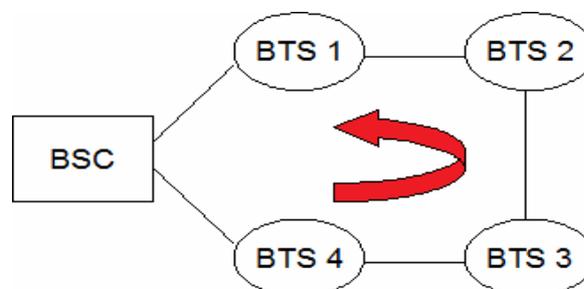


Figura 25: recorrido en bucle del enlace E1 redundante entre las BTS's q comparten un enlace

En caso de caída del enlace E1 principal, la BTS conmutará automáticamente para acceder al enlace E1 secundario y poder comunicarse así con su BSC. La asignación de canales del enlace E1 secundario a las BTS's será idéntica a la del enlace E1 principal.

Por lo tanto, según lo expuesto, cada interfaz Abis necesitará dos enlaces tipo E1 para un anillo de BTS's.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de asignación de *time-slots*. Los números del 0 al 31 representan los 32 'subcanales' de los que se disponen, es decir, los 32 *time-slots*. Cada transmisor ocupa dos *time-slots* para transmitir. El ejemplo representado en la figura 26 supone tres transmisores activos. De los 32 slots disponibles, hay dos reservados de antemano para señalización, sincronismo y control, de modo que restan 30 para la transmisión, (30 canales de voz multiplexados en el tiempo, TDMA). Cada *time-slot* tiene una velocidad de 64 Kbps, de lo que resulta un total de 2048 Kbps, de ahí que el enlace E1 sea de 2 Mbps.

Considerando tres transmisores activos por estación base como se comentó en el capítulo anterior, el número máximo de estaciones base en un anillo será de cuatro.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E3	E3	E3	E3	E3	E3	E4	E1	E2	E3	E4								
S	T1	T1	T2	T2	T3	T3	T1	T1	T2	T2	T3	T3	T1	T1	T2	T2	T3	T3	T1	T1	T2	T2	T3	T3	T4	T4	S1	S2	S3	S4	L

Figura 26: ejemplo de asignación de time slots en la interfaz Abis, dimensionado para BTS's de hasta 4 transmisores

El significado de las abreviaturas es el siguiente:

- En = Estación base número n = 1 ... 4
- S = Canal de sincronización de trama
- L = Canal para el control de anillo
- Tn = Transmisor n de la BTS correspondiente n = 1 ... 3
- Sn = Canal de señalización LAPD de la estación base n

6.2.2. RED DE ACCESO REPETIDORES

Respecto a los repetidores, se especifica a continuación, en la tabla 22, su ubicación y las distancias a sus respectivas BTS's. Para su conexión se recuerda que es precisa la instalación de un repartidor óptico (ODF) en cada ubicación, el cual será conectado a la unidad maestra (BMU) mediante fibra óptica.

BTS	Tipo emplazamiento	PK	Distancia BTS-FOR
BTS01	BTS	1,000	-
BTS01	FOR	2,300	1300 m
BTS01	FOR	4,100	3100 m
BTS01	FOR	5,900	4900 m
BTS02	BTS	8,730	-
BTS03	BTS	16,430	-
BTS03	FOR	17,730	1300 m
BTS03	FOR	19,530	3100 m
BTS03	FOR	21,330	4900 m
BTS04	BTS	28,660	-
BTS05	BTS	35,480	-
BTS06	BTS	45,860	-
BTS06	FOR	47,860	2000 m
BTS07	BTS	52,120	-
BTS07	FOR	54,620	2500 m
BTS07	FOR	56,370	4250 m
BTS07	FOR	58,120	6000 m
BTS08	BTS	60,210	-
BTS09	BTS	69,940	-
BTS10	BTS	77,180	-
BTS11	BTS	85,260	-

Tabla 22: Tabla de repetidores con su ubicación y distancia a BTS

6.2.3. RED DE ACCESO SISTEMAS DE SUPERVISIÓN

Todos y cada uno de los sistemas de supervisión y/o gestión existentes en cada uno de los emplazamientos (sistema de operación y mantenimiento de rectificadores, sistema de operación y mantenimiento de repetidores, alarmas, etc.), serán conectados vía TCP/IP al *switch* existente por medio de su correspondiente cable de conexión.

CAPÍTULO 7:

SUMINISTRO DE ENERGÍA

7.1 REDES Y TIPOS DE CONSUMIDORES

7.2 CUADRO ELÉCTRICO GSM-R Y COMPONENTES

- 7.2.1 ESTABILIZADOR Y FILTRO
- 7.2.2 ARMARIO DE RECTIFICADORES
- 7.2.3 INVERSOR GSM-R
- 7.2.4 ACOMETIDAS A REPETIDORES

7.3 PROTECCION DE PERSONAS CONTRA CONTACTOS

CAPÍTULO 7: SUMINISTRO DE ENERGÍA

En este capítulo se determinarán los equipos de suministro de energía necesarios para alimentar los diferentes equipos de la red de comunicaciones móviles, en función de la energía que los mismos necesiten para su correcto funcionamiento, teniendo en cuenta el tipo de corriente y permisividad a interrupciones. Estos equipos también se encargarán de la protección frente a elevaciones bruscas de tensión y perturbaciones que puedan proceder de la línea.

7.1 Redes y tipos de consumidores

Para garantizar un suministro continuado de corriente, el suministro de energía se realiza desde dos redes distintas, pero complementarias:

- Red 1: Procedente de la catenaria. A través de un transformador suministrará una tensión alterna monofásica de $230\text{ V} \pm 10\%$

- Red 2: Procedente de una línea que suministra una tensión alterna monofásica de $750\text{V} \pm 10\%$. Esta línea discurre en canaleta paralela a la línea de alta velocidad, adosada a la plataforma.

La tensión de la Red 1 se filtra previamente con un filtro que elimina las perturbaciones procedentes de la catenaria y protege los equipos contra elevaciones de tensión fuera de los márgenes permitidos. A continuación se estabiliza con un estabilizador de tensión que garantice una alimentación estable ante las posibles fluctuaciones de la tensión de catenaria.

Para la conmutación automática entre la Red 1 y 2 se instala un armario de conmutación, el cual supervisa continuamente la tensión de ambas.

Los sistemas de alimentación a instalar dependen de las características de los distintos consumidores de la red de comunicaciones móviles instalados (consumidores de corriente continua o alterna). Dentro de estos dos grupos podemos clasificar los distintos consumidores según el valor de la tensión de entrada y la posibilidad de permitir interrupciones breves del suministro de energía o no.

Así pues, contemplaremos tres tipos diferentes de consumidores:

- 1) Consumidores de corriente alterna 230 V que no permiten interrupciones
- 2) Consumidores de corriente alterna 230 V que permiten interrupciones
- 3) Consumidores de corriente continua

1) Consumidores de corriente alterna 230 V que no permiten interrupciones

Para la alimentación de estos equipos se procede a instalar un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) monofásico, compuesto por:

- un equipo rectificador/cargador de baterías
- un equipo inversor
- unas baterías recargables
- un by-pass o conmutador (para garantizar el suministro de tensión en caso de fallo).

El SAI se conecta con el suministro de energía proveniente de la línea de 750 V. La salida del SAI alimenta los equipos de la red de comunicaciones móviles (repetidores, BTS's, BMU...)

En primer lugar se rectifica la señal de energía, que alimenta las baterías, y luego se invierte para obtener una tensión de 230 Vac. En el caso de falta de suministro en la entrada al SAI, se empleará la energía almacenada en dichas baterías. La tensión de salida está sincronizada con la tensión de entrada y el activado o desactivado del conmutador se llevaría a cabo automáticamente y sin interrupción del suministro de energía.

2) Consumidores de corriente alterna 230 V que permiten interrupciones

En este tipo se encuentran englobados todos aquellos elementos que permiten interrupciones en el suministro de corriente. Estos equipos son alimentados desde la tensión procedente de línea de la catenaria (Red 1) Si se produjera una caída en dicha Red estos consumidores dejarían de funcionar, hasta que el problema sea resuelto. Los equipos que se encuentran dentro de este apartado son los equipos de aire acondicionado y equipos de iluminación.

Los equipos de aire acondicionado tienen un consumo muy elevado, es por ello que se alimentarán exclusivamente de la línea proveniente de catenaria.

3) Consumidores de corriente continua

Para el funcionamiento de los equipos de la red de comunicaciones móviles instalados en las casetas a lo largo de la vía es necesario disponer de una alimentación de corriente continua. Ésta es suministrada por unos rectificadores y unas baterías libres. Dichos rectificadores se instalarán de modo que en caso de fallo de uno de ellos, los restantes tengan capacidad suficiente como para suministrar la energía demandada.

7.2 Cuadro eléctrico GSM-R y componentes

En los cuadros eléctricos de la caseta de GSM-R se realiza la protección y distribución de energía eléctrica a 230 Vac, para los diferentes consumidores instalados en la caseta GSM-R. Tendrán dos líneas de entrada, procedentes de la transformación 25.000/230 Vac desde catenaria (Red 1) y de la transformación 750/230 Vac desde la Red 2.

De estas 2 líneas, la principal será la de 750/230 Vac, y de ella colgarán normalmente todos los consumos, excepto el aire acondicionado, dado su elevado consumo. El cuadro eléctrico dispondrá de una conmutación automática para, en el caso de fallo de esta red de 750 Vac, pasar todos los consumos a la línea procedente de la catenaria.

Dentro de este cuadro se encontrarán también ubicados elementos tales como protecciones, estabilizador, filtro, etc.

7.2.1 ESTABILIZADOR Y FILTRO

Como se acaba de explicar, se ubicarán dentro del cuadro eléctrico, asegurando el perfecto suministro de energía procedente de la catenaria, ya que eliminarán las fluctuaciones que esta línea tiene al paso del tren.

Se instalará un estabilizador de tensión monofásico de 10 KVA que cumplirá las siguientes características:

Entrada:

- Tensión: Monofásica 230 V \pm 20 %
- Frecuencia: 48 - 63 Hz (datos medidos de la catenaria)
- Factor de potencia: 0.95

Salida:

- Tensión: Monofásica 230 V \pm 5 %.
- Frecuencia: 48 - 63 Hz.

Igualmente se dispondrá de filtro monofásico a 1200 Hz para 10 KVA que elimine las perturbaciones procedentes de la catenaria y proteja a los equipos contra elevaciones de tensión fuera de los márgenes permitidos.

7.2.2. ARMARIO DE RECTIFICADORES GSM-R

El armario de rectificadores tiene como misión asegurar el suministro eléctrico a los consumidores de -48 Vdc, aportando además, dos *strings* de baterías de 400 Ah proporcionando en total 800 Ah, para asegurar el suministro con una autonomía de aproximadamente 6 horas.

El sistema dispondrá de una borna de puesta a tierra así como de los terminales de conexión para los conductores de:

- Entrada de c.a.
- Salida de c.c. rectificadas
- Alarmas y controles que se requieran

7.2.3. INVERSOR GSM-R

Para la alimentación a 230 Vac de los consumidores que requieren alimentación ininterrumpida se prevé la instalación de inversores que transformen los -48 Vdc a 230 Vac. Este equipamiento irá ubicado en el interior del armario de rectificadores.

Las características de estos equipos son las siguientes:

- La tensión de entrada será de -48 Vdc ± 20 %
- El voltaje de salida será 230 Vac de frecuencia 50 Hz

De la salida de este inversor se alimentarán los repetidores y el panel de alarmas.

7.2.4. ACOMETIDAS A REPETIDORES

Los repetidores que aseguran la cobertura GSM-R en el interior de túneles y estaciones requieren un suministro eléctrico a 230 V en corriente alterna libre de interrupciones. Por ello son alimentados desde la salida del inversor, posterior a las baterías que garantizan el suministro continuo.

El consumo de cada repetidor es de 160 W correspondiente a su potencia nominal. (Siemens). El cable utilizado para su alimentación será de tipo RZ1F3Z1-K 0.6 / 1 kV, de sección adecuada para la longitud del tramo en cada caso, y para el número de repetidores colgados en cada rama. A continuación se procederá a calcular las secciones de cable.

* Cajas de derivación a repetidores

Consiste en una caja metálica donde se ubica el interruptor magnetotérmico y protección diferencial desde el que se alimentará al repetidor, constituyendo todo ello el cuadro de alimentación del repetidor. Dicho cuadro se ubicará en el hastial del túnel en los puntos planificados para la instalación de los repetidores. A dicho cuadro se conectará el cable de alimentación proveniente de la caseta GSM-R y el del repetidor.

* Cálculo de secciones de cable

Para el cálculo de las secciones de los cables de suministro eléctrico se utilizará una hoja de cálculo de Excel donde se emplearán las siguientes fórmulas y datos. Teniendo presente que la tensión es monofásica a 230 Vac, que la potencia del repetidor es de 160 W y que la caída de tensión máxima será del 7%.

$$\Delta V = \frac{QSV}{2LP}$$

Donde:

- P = potencia del circuito ($P = I \cdot V$)
- L = longitud de la línea
- Q = 56 para el conductor de cobre
- S = sección de la línea en mm^2
- V = tensión

Los estándares de los cuales se dispone son: 4, 6 10, 16 y 25 mm^2

A continuación se presenta una tabla con las secciones de cable calculadas para la alimentación de cada uno de los repetidores de la línea, agrupados por tirada de cable.

Repetidores	PK	Sección calculada
BTS01	1,000	-
FOR11	2,300	16 mm^2
FOR12	4,100	16 mm^2
FOR13	5,900	16 mm^2
BTS03	16,536	-
FOR31	17,830	16 mm^2
FOR32	19,630	16 mm^2
FOR33	21,430	16 mm^2
BTS06	44,860	-
FOR61	47,860	6 mm^2
BTS07	52,120	-
FOR71	54,620	25 mm^2
FOR72	56,370	25 mm^2
FOR73	58,120	25 mm^2

Tabla 23: Secciones de cables calculadas para los repetidores

7.3 Protección de personas

Las personas que trabajan en contacto con los equipos de energía descritos anteriormente deben ser protegidas contra accidentes causados por contactos con cualquiera de las tensiones que se encuentran en la instalación.

Los equipos interiores garantizan la protección de las personas contra contactos indirectos mediante la puesta a tierra de todas las partes metálicas accesibles de los equipos de energía. Se realizará una conexión en anillo de todos los equipos el cual a su vez se conectará a tierra. El valor de la resistencia de tierra en ningún caso sobrepasará los 10 ohmios, según la norma Norma de instalación de toma de tierra (la norma NAT 102 - ET 03.433.102)

Igualmente, las partes metálicas de los equipos exteriores se conectarán también a tierra.

CAPÍTULO 8:

CONCLUSIONES Y

TRABAJO FUTURO

8.1 Conclusiones y trabajo futuro

El sistema GSM-R ha demostrado y continúa demostrando día tras día ser un sistema robusto, eficaz y muy válido para satisfacer los objetivos marcados para el mismo.

Constituye la base para un amplio número de servicios actualmente, número que se irá ampliando con el transcurso del tiempo según se vayan desarrollando las múltiples posibilidades que este sistema ofrece.

Principalmente cabe destacar que es la base sobre la que se diseña el sistema ERTMS (European Rail Traffic Management System). Este es un sistema para la gestión del tráfico ferroviario europeo que surge de la necesidad de homogeneización de los sistemas (de comunicaciones, de control y de seguridad de tráfico) existentes en los diferentes países.

Los objetivos principales de ERTMS son: [31]

- Mejorar la interoperabilidad del material rodante definiendo un estándar técnico de señalización y seguridad que permita superar las diferencias entre los distintos países.
- Aumento de capacidad de las líneas reduciendo el intervalo entre trenes.
- Aumentar los niveles de seguridad.

ERTMS está constituido actualmente por dos componentes: ETCS (European Train Control System) y GSM-R. ETCS realiza las funciones de control de los trenes. Existen tres niveles de aplicación del mismo:

- ETCS Nivel 1 utiliza la transmisión puntual de información al tren por medio de balizas como la que se puede observar en la figura. Está diseñado para líneas de baja o moderada densidad de tráfico.



Figura 27: Eurobaliza

- ETCS Nivel 2: La información se transmite empleando un canal de radio GSM-R. El RBC traza la localización de cada tren controlado dentro de su área y determina y transmite una descripción de la vía y autoriza los movimientos, de forma individualizada para cada tren controlado, de acuerdo con el sistema de señalización existente.

- ETCS Nivel 3 presenta funciones adicionales tales como la determinación activa de la distancia entre los trenes. Los trenes informan de manera activa sobre su posición al centro de control. La principal diferencia con los niveles anteriores consiste en que este nivel pretende una comunicación con el RBC continua, y no puntual como en los casos anteriores, que la información se transmite únicamente con el paso del tren por la eurobaliza.

GSM-R se encarga de la transmisión de voz y datos entre el tren y las instalaciones fijas.

Los niveles 1 y 2 del ETCS ya se encuentran en operación comercial. El nivel 3 en cambio no existe por el momento.

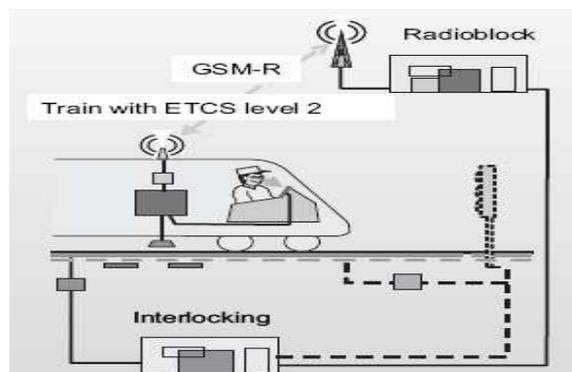


Figura 28: Esquema ECTS nivel 2. [32]

En contrapartida se sabe que para la implantación de este sistema es necesario dedicar canales radio exclusivos para su comunicación. Para ello habría que hacer un replanteo del número de canales necesarios por celda y por lo tanto del número de transmisores activos por BTS, con el consecuente riesgo que conlleva a largo plazo que, con la implantación de este sistema en un gran número de líneas, surja un problema de escasez de frecuencias.

El GSM-R es un sistema abierto al desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios. Una de sus interesantes y atractivas posibilidades es por ejemplo la de ofrecer diversos servicios de información y entretenimiento a los pasajeros que utilicen estas líneas de alta velocidad, como por ejemplo podría ser Internet.

La implantación comercial de GSM-R ha comenzado con un gran éxito en varias líneas, lo cual ha supuesto un aumento de confianza en el rendimiento y fiabilidad del sistema. Cada vez son más los países que se suman a esta difícil empresa de la estandarización, que conduce a la interoperabilidad, puesto que cada día los trenes recorren más kilómetros, a mayores velocidades, atravesando más fronteras y más países. Algunos de última adhesión son India y China, y en fase de estudio avanzado USA, Rusia y Australia. Concluyendo, este sistema tiene un futuro brillante asegurado debido al éxito obtenido hasta la fecha.

REFERENCIAS

- [1] “Comunicaciones Móviles. GSM”. Autores: R. Ayuso, B. Ceña, M. Fernández, B. Millán, M. Torre. Coordinador José María Hernando Rábanos. Fundación Airtel.
- [2] “The GSM System for Mobile Communications”.
Michel MOULY and Marie-Bernardette PAULET. Cell & Sys. 1992
- [3] D.G. Brennan, "Linear diversity combining techniques,"
Proc. IRE, vol.47, no.1, pp.1075–1102, June 1959
- [4] Behrouz A. Forouzan, “Transmisión de datos y redes de comunicaciones”. Mc Graw Hill. 2007
- [5] Andrew S. Tanenbaum, “Redes de computadores”. Pearson Prentice. 3rd ed. 1997
- [6] Roger L. Freeman. “Telecommunication system engineering” John Wiley & Sons, Inc. 1989
- [7] “The GSM network: GPRS evolution: one step towards UMTS” Tisal, Joachim. Chichester:
John Wiley & Sons, cop. 2001
- [8] “An introduction to GSM”. Redl, Siegmund M. Artech House. March 1995
- [9] Telefonía móvil digital GSM / Juan Reig Pascual... [et al.] Valencia : Universidad Politécnica
de Valencia, D.L. 2003
- [10] Artículo publicado en EL PAÍS el 15 abril de 1981:
http://www.elpais.com/articulo/economia/REBOLLO/_ALEJANDRO/RENFE/Renfe/experimenta/nuevos/sistemas/comunicacion/tren-tierra/elpepieco/19810415elpepieco_12/Tes
- [11] Reportaje de la revista Líneas. Número 313. Septiembre 2004:
http://www.revistalinas.com/Lineas51/reportajes02_01.htm
- [12] Artículo publicado por Abengoa: “Medidas de Cobertura para el Sistema Tren-Tierra de ADIF”:
http://www.abengoa.com/sites/abengoa/es/noticias_y_publicaciones/publicaciones/abril2009/abeinsa.html
- [13] Página web del E.T.S.I. (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones):
www.etsi.com
- [14] EIRENE/MORANE PROJECT:
<http://gsm-r.uic.asso.fr/specifications.html>
- [15] UIC Project EIRENE Functional Requirements Specification. Version 15. 17 mayo 2006.
http://www.uic.org/IMG/pdf/EIRENE_SRS_v15.pdf

- [16] MORANE 'Sub System Requirements Specification' SSRS. 20 Enero 2000.
- [17] Página web de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, U.I.T.:
<http://www.itu.int/net/about/index-es.aspx>
- [18] Página web del Administrador Nacional de Infraestructuras Ferroviarias. ADIF:
http://www.adif.es/es_ES/index.shtml
- [19] Web U.I.C. (Union International des Chemins de fer) / GSM-R:
<http://www.uic.org/spip.php?rubrique851>
- [20] UIC: ERTMS/GSM-R Quality of Service Test Specification
<http://www.era.europa.eu/Documents/ERTMS%20Documentation/Informative%20specifications/ERTMS%20GSM-R%20QoS%20Test%20Specification%20O-2475%20v1.0.pdf>
- [21] norma O-2475 (ERTMS/GSM-R Quality of Service Test Specification) versión 3.0 de la U.I.C. de QoS de GSM-R para ERTMS
http://gsm-r.uic.asso.fr/docs/qos_test_specification_0-2475_v3.pdf
- [22] Presentación en Power Point de Juan Mansana Robert. 'Las redes GSMR en España. Situación actual'. Mayo 2003
http://www.railforum.net/PresentacionesPonencias/2003/4%20-%20Comunicaciones%20-%20Mayo%202003/1-Redes_GSM-R_Espa%C3%B1a_INECO-TIFSA/INECO-TIFSA_Juan_Masana.pdf
- [23] Andrew (fabricante): www.andrew.com
- [24] Universidad Politécnica de Madrid. Diapositivas del curso 'Comunicaciones móviles digitales'.
<http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/comunicaciones-moviles-digitales/contenidos/Presentaciones/UMTS-07.pdf>
- [25] Especificación técnica 3GPP 05.05 (1999/2000) "Radio Access Network; Radio transmission and reception"
- [26] ITU-T G.707: <http://www.itu.int/itudoc/itu-t/aap/sg15aap/history/g707/g707.html>
- [27] Hoja datos de la BTS de Siemens
http://www.privateline.com/PCS/GSM/BS_24x_Brochure.pdf
- [28] GSM-R - Global Standard for Mobile Communications Rail
<http://www.willtek.com/spanish/technologies/gsmr>
- [29] "UNE-I-ETS 300609-1 : sistema europeo de telecomunicaciones digitales celulares (fase 2) : especificación de equipo para sistema de estación base (BSS). Parte 1, Aspectos de radio (GSM 11.21 versión 4.8.1)" / elaborada por el comité técnico AEN/CTN 133. Versión oficial de I-ETS 300 609-1, de febrero 1998. "Norma española experimental" Setiembre 1999.

[30] GLOSARIO UIC

<http://www.uic.org/spip.php?article427>

[31] Wikipedia del ferrocarril

<http://ferrocarriles.wikia.com/wiki/ERTMS>

[32] PERSPECTIVAS GLOBALES PARA ERTMS ETCS y GSM-R

Informe de UIC para el Congreso Anual de ERTMS. Berna, 11-13 de Septiembre de 2007

http://www.docutren.com/archivos/doc_internacionales/docs/docu30.pdf

[33] Publicación de Alejandro Rubio: “Sistema de Comunicaciones GSM-R: El Estándar Ferroviario de Comunicaciones”

<http://www.coit.es/publicac/publbit/bit144/trubio.pdf>

APÉNDICES

1 – Lista de acrónimos

2 - Tabla Erlang B

1 – Lista de acrónimos

EIRENE: European Integrated Railway radio Enhanced Network

MORANE: Mobile Radio for railway Networks in Europe.

UIC: Union Internationale des Chemins de fer.

GSM: Global System for Mobile Communication.

ETSI: European Telecommunications Standards Institute.

ASCI: Advanced Speech Call Items.

eMLPP: enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption service (servicio mejorado de precedencia y prioridad multinivel) - Llamadas prioritarias -

ERTMS: European Rail Traffic Management System.

BTS: Estación base transceptora.

BMU: Unidades Maestras Repetidoras.

BSC: Controlador de Estaciones Base.

TRAU: Unidad Transcodificadora y Adaptadora de Velocidad de Transmisión. (también llamada TCU).

MSC: Central de conmutación de móviles.

PLMN: public land mobile network.

IN: Intelligent Network, red inteligente.

MS: Mobile Stations, Estaciones móviles.

HLR: Home Location Register.

VLR: Visitor Location Register.

CCITT. Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico.

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones.

ETCS: European Train Control System.

ARFCN: Absolute Radio Frequency Channel Number.

SDH: Synchronous Digital Hierachy. Jerarquía digital síncrona.

STM-1: Synchronous Transport Module level 1.

RBC: Radio Block Centre.

FEC: Forward Error Control.

2 – Tabla Erlang B

Erlang B Traffic Table

Maximum Offered Load Versus B and N
B is in %

N/B	0.01	0.05	0.1	0.5	1.0	2	5	10	15	20	30	40
1	.0001	.0005	.0010	.0050	.0101	.0204	.0526	.1111	.1765	.2500	.4286	.6667
2	.0142	.0321	.0458	.1054	.1526	.2235	.3813	.5954	.7962	1.000	1.449	2.000
3	.0868	.1517	.1938	.3490	.4555	.6022	.8994	1.271	1.603	1.930	2.633	3.480
4	.2347	.3624	.4393	.7012	.8694	1.092	1.525	2.045	2.501	2.945	3.891	5.021
5	.4520	.6486	.7621	1.132	1.361	1.657	2.219	2.881	3.454	4.010	5.189	6.596
6	.7282	.9957	1.146	1.622	1.909	2.276	2.960	3.758	4.445	5.109	6.514	8.191
7	1.054	1.392	1.579	2.158	2.501	2.935	3.738	4.666	5.461	6.230	7.856	9.800
8	1.422	1.830	2.051	2.730	3.128	3.627	4.543	5.597	6.498	7.369	9.213	11.42
9	1.826	2.302	2.558	3.333	3.783	4.345	5.370	6.546	7.551	8.522	10.58	13.05
10	2.260	2.803	3.092	3.961	4.461	5.084	6.216	7.511	8.616	9.685	11.95	14.68
11	2.722	3.329	3.651	4.610	5.160	5.842	7.076	8.487	9.691	10.86	13.33	16.31
12	3.207	3.878	4.231	5.279	5.876	6.615	7.950	9.474	10.78	12.04	14.72	17.95
13	3.713	4.447	4.831	5.964	6.607	7.402	8.835	10.47	11.87	13.22	16.11	19.60
14	4.239	5.032	5.446	6.663	7.352	8.200	9.730	11.47	12.97	14.41	17.50	21.24
15	4.781	5.634	6.077	7.376	8.108	9.010	10.63	12.48	14.07	15.61	18.90	22.89
16	5.339	6.250	6.722	8.100	8.875	9.828	11.54	13.50	15.18	16.81	20.30	24.54
17	5.911	6.878	7.378	8.834	9.652	10.66	12.46	14.52	16.29	18.01	21.70	26.19
18	6.496	7.519	8.046	9.578	10.44	11.49	13.39	15.55	17.41	19.22	23.10	27.84
19	7.093	8.170	8.724	10.33	11.23	12.33	14.32	16.58	18.53	20.42	24.51	29.50
20	7.701	8.831	9.412	11.09	12.03	13.18	15.25	17.61	19.65	21.64	25.92	31.15
21	8.319	9.501	10.11	11.86	12.84	14.04	16.19	18.65	20.77	22.85	27.33	32.81
22	8.946	10.18	10.81	12.64	13.65	14.90	17.13	19.69	21.90	24.06	28.74	34.46
23	9.583	10.87	11.52	13.42	14.47	15.76	18.08	20.74	23.03	25.28	30.15	36.12
24	10.23	11.56	12.24	14.20	15.30	16.63	19.03	21.78	24.16	26.50	31.56	37.78
25	10.88	12.26	12.97	15.00	16.13	17.51	19.99	22.83	25.30	27.72	32.97	39.44
26	11.54	12.97	13.70	15.80	16.96	18.38	20.94	23.89	26.43	28.94	34.39	41.10
27	12.21	13.69	14.44	16.60	17.80	19.27	21.90	24.94	27.57	30.16	35.80	42.76
28	12.88	14.41	15.18	17.41	18.64	20.15	22.87	26.00	28.71	31.39	37.21	44.41
29	13.56	15.13	15.93	18.22	19.49	21.04	23.83	27.05	29.85	32.61	38.63	46.07
30	14.25	15.86	16.68	19.03	20.34	21.93	24.80	28.11	31.00	33.84	40.05	47.74
31	14.94	16.60	17.44	19.85	21.19	22.83	25.77	29.17	32.14	35.07	41.46	49.40
32	15.63	17.34	18.21	20.68	22.05	23.73	26.75	30.24	33.28	36.30	42.88	51.06
33	16.34	18.09	18.97	21.51	22.91	24.63	27.72	31.30	34.43	37.52	44.30	52.72
34	17.04	18.84	19.74	22.34	23.77	25.53	28.70	32.37	35.58	38.75	45.72	54.38
35	17.75	19.59	20.52	23.17	24.64	26.44	29.68	33.43	36.72	39.99	47.14	56.04
36	18.47	20.35	21.30	24.01	25.51	27.34	30.66	34.50	37.87	41.22	48.56	57.70
37	19.19	21.11	22.08	24.85	26.38	28.25	31.64	35.57	39.02	42.45	49.98	59.37
38	19.91	21.87	22.86	25.69	27.25	29.17	32.62	36.64	40.17	43.68	51.40	61.03
39	20.64	22.64	23.65	26.53	28.13	30.08	33.61	37.72	41.32	44.91	52.82	62.69
40	21.37	23.41	24.44	27.38	29.01	31.00	34.60	38.79	42.48	46.15	54.24	64.35
41	22.11	24.19	25.24	28.23	29.89	31.92	35.58	39.86	43.63	47.38	55.66	66.02
42	22.85	24.97	26.04	29.09	30.77	32.84	36.57	40.94	44.78	48.62	57.08	67.68
43	23.59	25.75	26.84	29.94	31.66	33.76	37.57	42.01	45.94	49.85	58.50	69.34

44	24.33	26.53	27.64	30.80	32.54	34.68	38.56	43.09	47.09	51.09	59.92	71.01
45	25.08	27.32	28.45	31.66	33.43	35.61	39.55	44.17	48.25	52.32	61.35	72.67
46	25.83	28.11	29.26	32.52	34.32	36.53	40.55	45.24	49.40	53.56	62.77	74.33
47	26.59	28.90	30.07	33.38	35.22	37.46	41.54	46.32	50.56	54.80	64.19	76.00
48	27.34	29.70	30.88	34.25	36.11	38.39	42.54	47.40	51.71	56.03	65.61	77.66
49	28.10	30.49	31.69	35.11	37.00	39.32	43.53	48.48	52.87	57.27	67.04	79.32
50	28.87	31.29	32.51	35.98	37.90	40.26	44.53	49.56	54.03	58.51	68.46	80.99
51	29.63	32.09	33.33	36.85	38.80	41.19	45.53	50.64	55.19	59.75	69.88	82.65
52	30.40	32.90	34.15	37.72	39.70	42.12	46.53	51.73	56.35	60.99	71.31	84.32
53	31.17	33.70	34.98	38.60	40.60	43.06	47.53	52.81	57.50	62.22	72.73	85.98
54	31.94	34.51	35.80	39.47	41.51	44.00	48.54	53.89	58.66	63.46	74.15	87.65
55	32.72	35.32	36.63	40.35	42.41	44.94	49.54	54.98	59.82	64.70	75.58	89.31
56	33.49	36.13	37.46	41.23	43.32	45.88	50.54	56.06	60.98	65.94	77.00	90.97
57	34.27	36.95	38.29	42.11	44.22	46.82	51.55	57.14	62.14	67.18	78.43	92.64
58	35.05	37.76	39.12	42.99	45.13	47.76	52.55	58.23	63.31	68.42	79.85	94.30
59	35.84	38.58	39.96	43.87	46.04	48.70	53.56	59.32	64.47	69.66	81.27	95.97
60	36.62	39.40	40.80	44.76	46.95	49.64	54.57	60.40	65.63	70.90	82.70	97.63
61	37.41	40.22	41.63	45.64	47.86	50.59	55.57	61.49	66.79	72.14	84.12	99.30
62	38.20	41.05	42.47	46.53	48.77	51.53	56.58	62.58	67.95	73.38	85.55	101.0
63	38.99	41.87	43.31	47.42	49.69	52.48	57.59	63.66	69.11	74.63	86.97	102.6
64	39.78	42.70	44.16	48.31	50.60	53.43	58.60	64.75	70.28	75.87	88.40	104.3
65	40.58	43.52	45.00	49.20	51.52	54.38	59.61	65.84	71.44	77.11	89.82	106.0
66	41.38	44.35	45.85	50.09	52.44	55.33	60.62	66.93	72.60	78.35	91.25	107.6
67	42.17	45.18	46.69	50.98	53.35	56.28	61.63	68.02	73.77	79.59	92.67	109.3
68	42.97	46.02	47.54	51.87	54.27	57.23	62.64	69.11	74.93	80.83	94.10	111.0
69	43.77	46.85	48.39	52.77	55.19	58.18	63.65	70.20	76.09	82.08	95.52	112.6
70	44.58	47.68	49.24	53.66	56.11	59.13	64.67	71.29	77.26	83.32	96.95	114.3
71	45.38	48.52	50.09	54.56	57.03	60.08	65.68	72.38	78.42	84.56	98.37	116.0
72	46.19	49.36	50.94	55.46	57.96	61.04	66.69	73.47	79.59	85.80	99.80	117.6
73	47.00	50.20	51.80	56.35	58.88	61.99	67.71	74.56	80.75	87.05	101.2	119.3
74	47.81	51.04	52.65	57.25	59.80	62.95	68.72	75.65	81.92	88.29	102.7	120.9
75	48.62	51.88	53.51	58.15	60.73	63.90	69.74	76.74	83.08	89.53	104.1	122.6
76	49.43	52.72	54.37	59.05	61.65	64.86	70.75	77.83	84.25	90.78	105.5	124.3
77	50.24	53.56	55.23	59.96	62.58	65.81	71.77	78.93	85.41	92.02	106.9	125.9
78	51.05	54.41	56.09	60.86	63.51	66.77	72.79	80.02	86.58	93.26	108.4	127.6
79	51.87	55.25	56.95	61.76	64.43	67.73	73.80	81.11	87.74	94.51	109.8	129.3
80	52.69	56.10	57.81	62.67	65.36	68.69	74.82	82.20	88.91	95.75	111.2	130.9
81	53.51	56.95	58.67	63.57	66.29	69.65	75.84	83.30	90.08	96.99	112.6	132.6
82	54.33	57.80	59.54	64.48	67.22	70.61	76.86	84.39	91.24	98.24	114.1	134.3
83	55.15	58.65	60.40	65.39	68.15	71.57	77.87	85.48	92.41	99.48	115.5	135.9
84	55.97	59.50	61.27	66.29	69.08	72.53	78.89	86.58	93.58	100.7	116.9	137.6
85	56.79	60.35	62.14	67.20	70.02	73.49	79.91	87.67	94.74	102.0	118.3	139.3
86	57.62	61.21	63.00	68.11	70.95	74.45	80.93	88.77	95.91	103.2	119.8	140.9
87	58.44	62.06	63.87	69.02	71.88	75.42	81.95	89.86	97.08	104.5	121.2	142.6
88	59.27	62.92	64.74	69.93	72.82	76.38	82.97	90.96	98.25	105.7	122.6	144.3
89	60.10	63.77	65.61	70.84	73.75	77.34	83.99	92.05	99.41	107.0	124.0	145.9
90	60.92	64.63	66.48	71.76	74.68	78.31	85.01	93.15	100.6	108.2	125.5	147.6

91	61.75	65.49	67.36	72.67	75.62	79.27	86.04	94.24	101.8	109.4	126.9	149.3
92	62.58	66.35	68.23	73.58	76.56	80.24	87.06	95.34	102.9	110.7	128.3	150.9
93	63.42	67.21	69.10	74.50	77.49	81.20	88.08	96.43	104.1	111.9	129.8	152.6
94	64.25	68.07	69.98	75.41	78.43	82.17	89.10	97.53	105.3	113.2	131.2	154.3
95	65.08	68.93	70.85	76.33	79.37	83.13	90.12	98.63	106.4	114.4	132.6	155.9
96	65.92	69.79	71.73	77.24	80.31	84.10	91.15	99.72	107.6	115.7	134.0	157.6
97	66.75	70.65	72.61	78.16	81.25	85.07	92.17	100.8	108.8	116.9	135.5	159.3
98	67.59	71.52	73.48	79.07	82.18	86.04	93.19	101.9	109.9	118.2	136.9	160.9
99	68.43	72.38	74.36	79.99	83.12	87.00	94.22	103.0	111.1	119.4	138.3	162.6
100	69.27	73.25	75.24	80.91	84.06	87.97	95.24	104.1	112.3	120.6	139.7	164.3

N is the number of servers. The numerical column headings indicate blocking probability B in %. Table generated by Dan Dexter

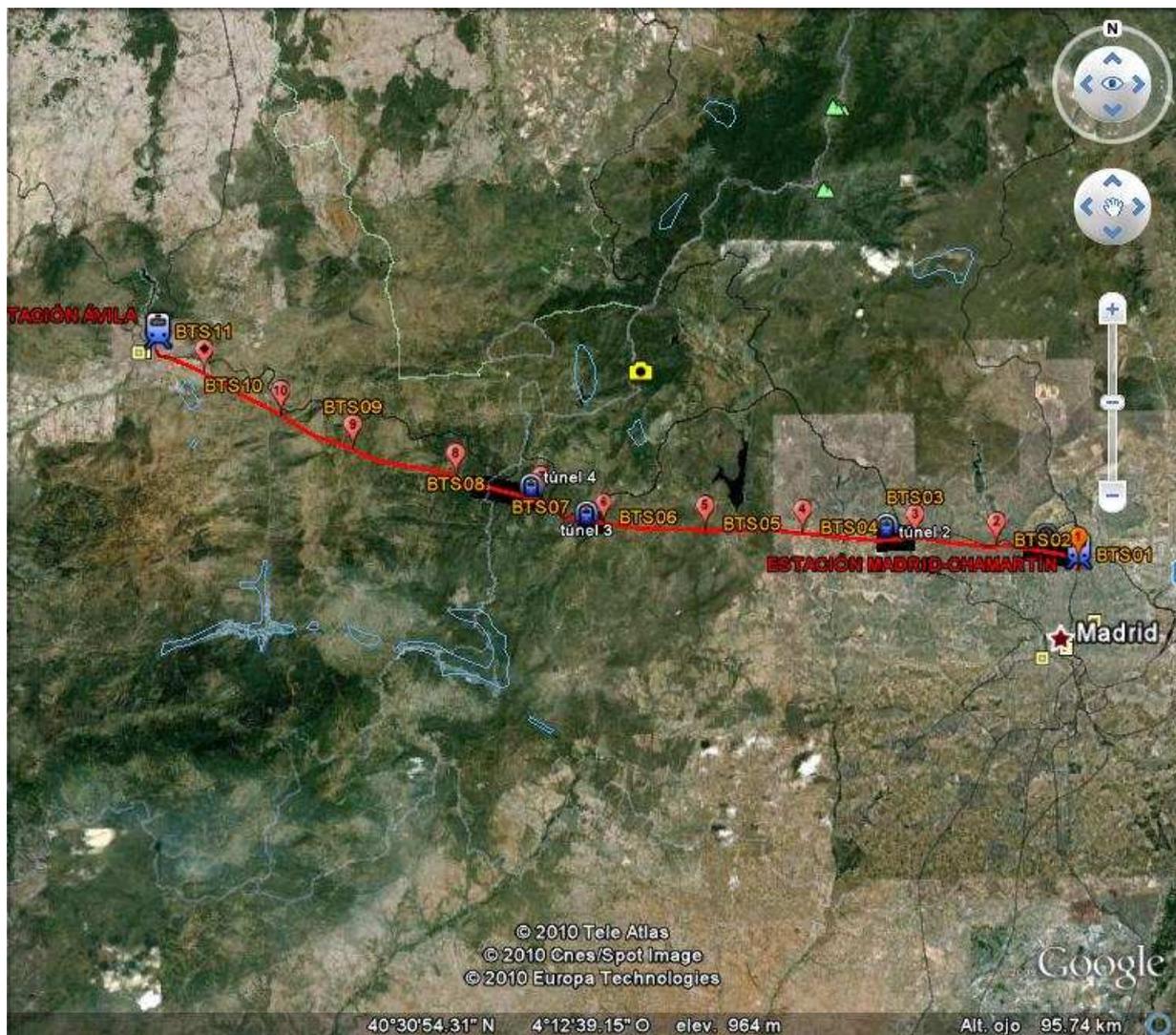
PLANOS

- 1 Trazado de la Línea Alta Velocidad Madrid – Ávila
- 2 Ubicación de las BTS en la Línea
- 3 Cuadro eléctrico en caseta GSM-R
- 4 Diagramas de radiación de las antenas para GSM-R

1 - Trazado de la Línea Alta Velocidad Madrid - Ávila

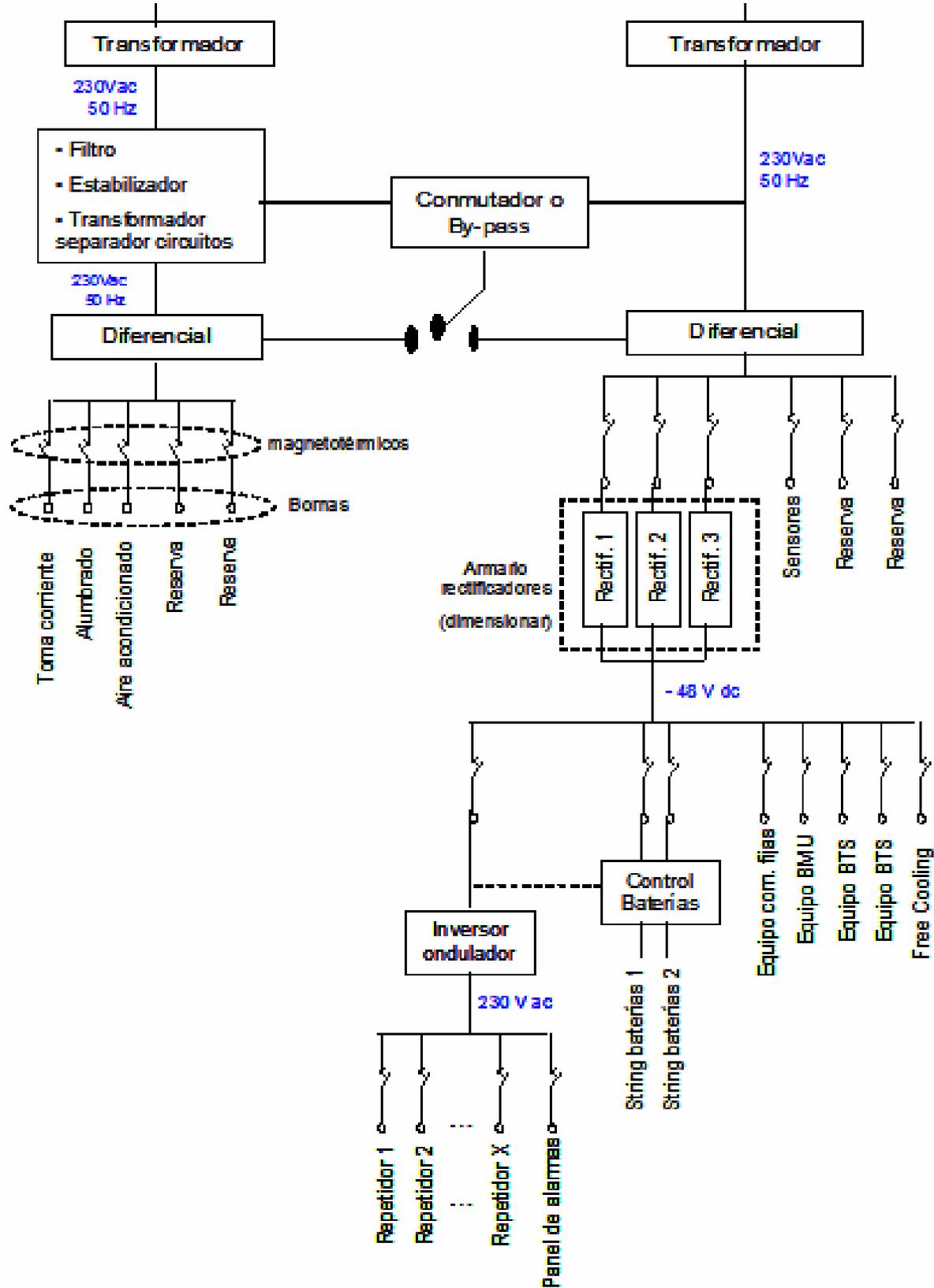


2 - Ubicación de las BTS en la Línea



**Línea de Catenaria
Red 1: 25 KV ac**

**Línea de canaleta
Red 2: 750 V ac**

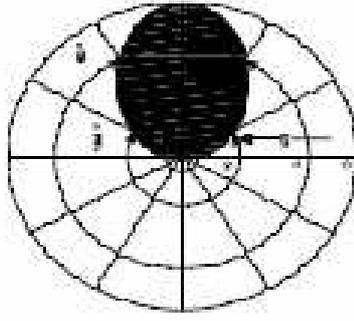


Plano: Cuadro eléctrico en caseta GSM-R

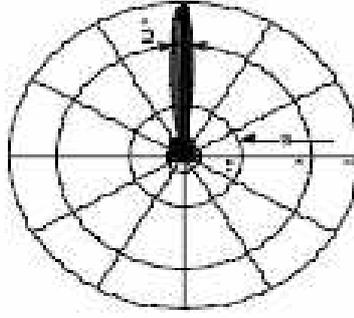
Proyecto: Aplicación de un sistema de radiotelefonía GSM-R a la línea de Alta Velocidad Madrid - Ávila

Antena de polarización circular, 65°

PATTERN HORIZONTAL

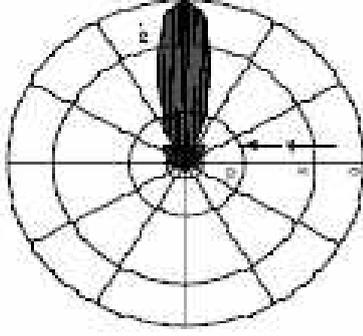


PATTERN VERTICAL

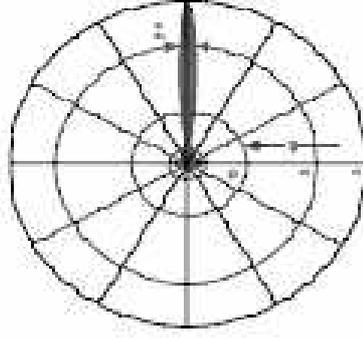


Antena de polarización circular, 30°

PATTERN HORIZONTAL



PATTERN VERTICAL



Proyecto:

Aplicación de un sistema de radiotelefonía
GSM-R a la línea de Alta Velocidad Madrid - Ávila

Plano:

Diagramas de radiación de las antenas para
GSM-R

FOTOS



Radio Cab de Siemens. Terminal embarcado en cabina ubicado en la MSC de Atocha para pruebas.



Línea de 750 V que discurre en canaleta paralela a la vía, adosada a la plataforma de la misma.



Equipo de transporte STM-16 en la MSC Atocha.



Emplazamiento tipo de GSM-R. Torre y caseta de GSM-R



Nodo de acceso STM-1 en la caseta GSM-R



Panel de alarmas en la caseta



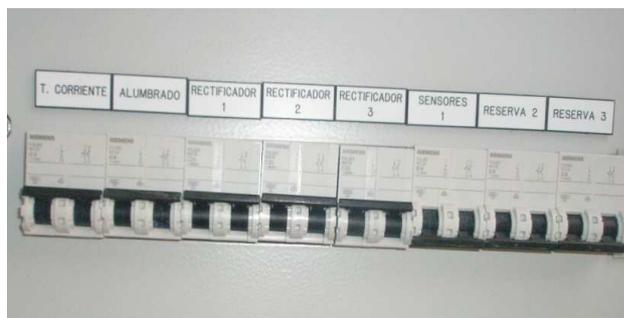
Armario BTS en caseta GSM-R.
Configuración (1+1). Los dos equipos inferiores son los transmisores: el activo y el de reserva. Arriba los dos cables para alimentar las antenas.



Cuadro eléctrico en la caseta GSM-R.
Se pueden apreciar los distintos magnetotérmicos



BMU. Instalada en la caseta en los casos en los que su BTS esté conectada a uno o más repetidores.



Detalle del armario rectificadores



Armario rectificadores en caseta.



Arqueta de tierras en el exterior de la caseta
Cada parte metálica está conectada a tierra.
Esta a su vez se conecta a la tierra de vía.



Antena de polarización circular de la BTS en boca de túnel.



Repetidor de fibra óptica adosado al hastial de túnel. Se aprecia su ODF, su caja de alimentación, y otros sistemas como por ejemplo detectores de presencia etc. Las antenas son de polarización circular.

PRESUPUESTO

1 - Emplazamiento tipo GSM-R

2 - Repetidor dentro de túnel

1 - Emplazamiento tipo GSM-R

Emplazamiento tipo GSM - R	Versión O-S		
	PRECIO	MEDICIÓN	IMPORTE
Sistema Radio			
Ampliación capacidad BSC en 1 transmisor	1.696,05	2,00	3.392,10
Estación base en configuración 1+1	29.857,48	1,00	29.857,48
Unidad maestra de repetidores, BMU	21.276,93	1,00	21.276,93
Sistema Operación y Mantenimiento			
Ampliación software OMC radio para 1 transmisor	394,78	2,00	789,56
TOTAL EQUIPOS FIJOS DE RED			55.316,07
Guía ondas y elementos asociados			
Guía-ondas BTS 20 m 2 sectores	4.510,45	1,00	4.510,45
Guía-ondas BTS 20 m 2 sectores	4.510,45	1,00	4.510,45
Antenas			
Antena polarización cruzada 65°	917,49	1,00	917,49
Antena polarización circular	1.424,64	1,00	1.424,64
TOTAL SISTEMA RADIANTE			11.363,03
Equipamiento auxiliar			
Equipo de climatización compacto exterior 5,6 kW	4.347,03	1,00	4.347,03
Baterías tipo AGM 184 Ah	1.657,80	1,00	1.657,80
Estabilizador y filtro 20 kVA	9.375,27	1,00	9.375,27
Caja embornado y protección rayos	916,71	1,00	916,71
Armario energía GSM-R doble acometida	7.600,53	1,00	7.600,53
Acometida no ignífuga Al 2x25 mm ² en canalización	5,64	67,00	377,88
Acometida no ignífuga Al 2x50 mm ² en canalización	7,98	125,00	997,5
TOTAL EQUIPAMIENTO AUXILIAR			25.272,72
Acondicionamiento de emplazamiento			
Despeje y desbroce pequeñas superficies terreno	6,71	150,00	1.006,50
Rejilla trámex	98,89	1,00	98,89
Bordillo de hormigón de 14/17x28x100 cm	23,3	36,00	838,8
Rotura y reposición de cuneta	102,95	4,00	411,8
Adecuación explanación	25,8	130,00	3.354,00
Desmontaje de vallados	53,63	40,00	2.145,20
Red de tierras exterior caseta GSMR	721,09	1,00	721,09
Red de tierras para torres 25 m	1.088,19	1,00	1.088,19
Instalación de Bionda	87,68	5,00	438,4
Instalación de vallado	81,41	30,00	2.442,30
Losa de cimentación	136,43	13,35	1.821,34

Puerta de paso de 2 hojas	367,71	1,00	367,71
Hormigón para limpieza de fondos	51,03	1,85	94,41
Caseta GSM-R 3,7 x 2,2 x 2,5 m	18.411,03	1,00	18.411,03
Canalizaciones y arquetas			
Arqueta de hormigón, de registro y bajo caseta (90x90x114 cm) y tapa hormigón	972,3	2,00	1.944,60
Arqueta de hormigón, de derivación (84x74x99 cm) y tapa hormigón	776,2	1,00	776,2
Arqueta de ladrillo, de 40x40x60 cm para puente de medidas	253,58	1,00	253,58
Arqueta de ladrillo, tipo grande (90x90x150 cm) y tapa hormigón	792,58	3,00	2.377,74
Canalización superficial 4 T, acero 4"	179,91	50,00	8.995,50
Canalización 6 T, polietileno 110 mm, normal	107	9,00	963
Torres			
Balizamiento nocturno LED torre 25 m	625,5	1,00	625,5
Torre 25 m GSM-R + 4 operadores	25.463,36	1,00	25.463,36
Cimentación para base de torre o mástil	105,68	44,38	4.690,08
Excavación en desmonte en terreno blando pequeña superficie	25,06	44,38	1.112,16
Armado cimentación base torre o mástil	2,07	3.000,00	6.210,00
Estudio geotécnico torres terrenos favorables	2.598,86	1,00	2.598,86
TOTAL OBRA CIVIL			89.250,24
Documentación y formación			
Documentacion as-built GSM-R/Op	535,19	1,00	535,19
TOTAL DOCUMENTACIÓN Y FORMACIÓN			535,19
Gestión de pruebas y puesta en servicio			
Pruebas y mediciones de QoS en GSM-R por BTS	1.889,94	1,00	1.889,94
Ingeniería, replanteos y medidas de verificación, por BTS	566,98	1,00	566,98
TOTAL GESTIÓN DE PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO			2.456,92
TOTAL EMPLAZAMIENTO TIPO GSM-R		TOTAL	184.194,17

2 - Repetidor dentro de túnel

Repetidor dentro de túnel			
Sistema radio			
Repetidor fibra óptica 2 canales selectivo	17.019,95	1,00	17.019,95
TOTAL EQUIPOS FIJOS DE RED			17.019,95
Guía - ondas			
Guía-ondas repetidor túnel 2 sectores	2.222,63	1,00	2.222,63
Antenas			
Antena polarización circular	1.424,64	2,00	2.849,28
TOTAL SISTEMA RADIANTE			5.071,91
Equipamiento auxiliar			
Caja de derivación FOR GSM-R	190,34	1,00	190,34
Acometida no ignífuga Al 2x35 mm ² en canaleta	6,36	1.445,00	9.190,20
TOTAL EQUIPAMIENTO AUXILIAR			9.380,54
Acondicionamiento emplazamiento			
Red de tierras para repetidor 2 sectores	286,17	1,00	286,17
Canalizaciones y arquetas			
Canalización tubo corrugado de 29 mm con alma de acero	5,31	15,00	79,65
TOTAL OBRA CIVIL			365,82
TOTAL REPETIDOR DENTRO TÚNEL		TOTAL	31.838,22

PLIEGO DE
CONDICIONES

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, 'Aplicación de un sistema de radiotelefonía GSM-R en la Línea de Alta Velocidad Madrid-Ávila'. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.
8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.