

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Diseño de un sistema de
radiocomunicaciones para servicios de
emergencia en un túnel de carreteras”**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Alejandro Fuster Ferrer

Tutor/a:

María Consuelo Part Escrivá

GANDIA, 2013

Resumen

El objetivo de este proyecto es realizar el diseño de un sistema de cobertura para radiocomunicaciones de emergencia en un túnel de carretera situado en la frontera de España y Francia. Elegimos esta ubicación debido a las características especiales que deberá tener el diseño, ya que será necesaria la combinación de las frecuencias propias de cada país para la correcta coordinación de las fuerzas de seguridad en caso de incidente. Es de gran importancia que los servicios de emergencia y la propia dirección del túnel puedan coordinarse, incluso notificar a los usuarios del túnel mediante la banda de FM actuaciones a seguir o rutas de evacuación.

El servicio de comunicaciones que vamos a proporcionar, poseerá las mismas prestaciones y características que un sistema exterior, realizando una extensión de la cobertura al interior del túnel, utilizando para este cometido cable radiante como elemento de transmisión y de radiación de todo el espectro y fibra óptica para realizar los enlaces entre los diferentes equipos instalados en el sistema. De esta manera, se conseguirá una cobertura uniforme a lo largo de todo el túnel y se proporcionará un sistema redundante, pudiendo soportar cortes en el cable radiante, fibra óptica ó averías de los equipos amplificadores.

Para mayor comprensión del proyecto, se adjuntan diseños de los equipos así como explicaciones detalladas de cada uno de los dispositivos necesarios.

Palabras clave: sistemas emergencia túneles, cable radiante, cobertura interior.

Abstract

The aim of this project is to design a radio system for public safety coverage on a highway tunnel located on the border between Spain and France. We used this specific location because of the special features that is required in the design as it will be necessary to combine the frequencies of both countries. Also for the correct operation of the radio system we had to coordinate between the securities forces of both countries. It is of great importance that emergency services and tunnel management can communicate via FM radio to the public to coordinate a safe evacuation.

The communications service that we provide extends the signal and functionality from outside to inside the tunnel the tunnel. For this purpose we use radiating cable as a transmission means of re-radiating the whole spectrum and a fibre optic to link to the different locations within the tunnel. This will provide a uniform coverage throughout the tunnel whilst providing a redundant design to avoid signal losses when the radiating cable radiating, optical fibre or active systems fail.

To get further information on the project we have been done several schematics and detailed explanation of all the necessary devices to carry out this safety coverage system.

Key words: tunnel safety communications, radiating cable, indoor coverage.

INDICE

Resumen	3
Abstract	3

MEMORIA DESCRIPTIVA

1 SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES DEL TÚNEL.....	7
1.1 Motivación y objetivos	7
2 SELECCION DE FRECUENCIAS A UTILIZAR.....	8
2.1 Frecuencias boca España	8
2.2 Frecuencias boca Francia.....	9
3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....	10
3.1 Boca España	11
3.1.1 Sistema de captación y enlace principal.....	11
3.1.2 Maestro principal.....	12
3.1.2.1 Equipos activos	13
3.1.2.2 Equipos pasivos. Multicombinador.....	14
3.1.2.3 Sistema óptico	17
3.1.3 Maestro secundario	18
3.1.3.1 Equipos activos	18
3.1.3.2 Equipos pasivos. Multicombinador.....	19
3.1.3.4 Sistema óptico	21
3.1.4 Sistema de enlace secundario.....	22
3.1.5 Niveles de señal boca España.....	23
3.1.6 Esquema general boca España	24
3.2 Sistema remoto	25
3.2.1 Equipos activos	26
3.2.2 Equipos pasivos. Multicombinador.....	27
3.2.3 Niveles de señal sistema remoto	28
3.2.4 Esquema general sistema remoto	29
3.3 Boca Francia	30
3.3.1 Sistema de captación y enlace principal.....	30
3.3.2 Maestro principal.....	32
3.3.2.1 Equipos activos	33
3.3.2.2 Equipos pasivos. Multicombinador.....	34
3.3.2.3 Sistema óptico	35
3.3.3 Maestro secundario	35
3.3.3.1 Equipos activos	36
3.3.3.2 Equipos pasivos. Multicombinador.....	37
3.3.3.3 Sistema óptico	39
3.3.4 Sistema de enlace secundario.....	39
3.3.5 Niveles de señal boca Francia	40
3.3.6 Esquema general boca Francia.....	41
3.4 Sistema de enlace óptico.....	42

3.5	Sistema redundante. Criterio y funcionalidad	43
4	CABLE RADIANTE. NIVELES DE SEÑAL	44
4.1	Validación del cable radiante 7/8" y 1-1/4"	45
4.1.1	Cálculos teóricos de potencia en el interior del túnel.....	46
4.1.2	Cálculos teóricos de potencia uplink.....	48
5	CONCLUSIONES	49
6	ANEXOS.....	49
7	BIBLIOGRAFIA.....	49
8	GLOSARIO.....	50

Índice de tablas

Tabla 1.	Resumen requisitos mínimos túneles unidireccionales.....	8
Tabla 2.	Resumen requisitos mínimos túneles bidireccionales.....	8
Tabla 3.	Atenuaciones cable coaxial enlace principal.....	12
Tabla 4.	Atenuaciones totales multicombinador 1 España. DL	17
Tabla 5.	Atenuaciones totales multicombinador 1 España. UL	17
Tabla 6.	Atenuaciones totales multicombinador 2 España. DL	20
Tabla 7.	Atenuaciones totales multicombinador 2 España. UL	20
Tabla 8.	Atenuaciones totales multicombinador 3 España. DL	21
Tabla 9.	Atenuaciones totales multicombinador 3 España. UL	21
Tabla 10.	Atenuaciones cable coaxial enlace secundario.....	22
Tabla 11.	Cálculo niveles Master España	23
Tabla 12.	Niveles de señal enlace secundario boca España	23
Tabla 13.	Atenuaciones totales multicombinador 1 Remoto. DL	27
Tabla 14.	Atenuaciones totales multicombinador 1 Remoto. UL	27
Tabla 15.	Atenuaciones totales multicombinador 2 Remoto. DL	28
Tabla 16.	Atenuaciones totales multicombinador 2 Remoto. UL	28
Tabla 17.	Niveles de señal sistema remoto	29
Tabla 18.	Atenuaciones cable coaxial enlace principal.....	31
Tabla 19.	Atenuaciones totales multicombinador 1 Francia. DL.....	35
Tabla 20.	Atenuaciones totales multicombinador 1 Francia. UL.....	35
Tabla 21.	Atenuaciones totales multicombinador 2 Francia. DL.....	37
Tabla 22.	Atenuaciones totales multicombinador 2 Francia. UL.....	37
Tabla 23.	Atenuaciones totales multicombinador 3 España. DL	38
Tabla 24.	Atenuaciones totales multicombinador 3 España. UL	38
Tabla 25.	Cálculos niveles Master Francia	40
Tabla 26.	Niveles de señal enlace secundario boca Francia	40
Tabla 27.	Resumen características técnicas del cable radiante	46
Tabla 28.	Resumen niveles de cobertura radiantes (modo nominal)	47
Tabla 29.	Resumen niveles de cobertura radiantes (modo degradado).....	47

Índice de imágenes

Imagen 1. Señalización Radio	7
Imagen 2. Arquitectura del sistema.....	10
Imagen 3. Sistema de captación y enlace principal.....	11
Imagen 4. Sistema maestro principal. Lado España.....	13
Imagen 5. Símbolo amplificador canalizado bidireccional.....	14
Imagen 6. Símbolo amplificador canalizado unidireccional.....	14
Imagen 7. Símbolo acoplador direccional.....	14
Imagen 8. Símbolo acoplador banda cruzada.....	15
Imagen 9. Símbolo distribuidor/combinador	15
Imagen 10. Símbolo filtros duplexores	15
Imagen 11. Multicombinador 1. Maestro principal lado España	16
Imagen 12. Símbolo Tx y Rx óptico + multiplexor	17
Imagen 13. Rack maestro secundario. Lado España.....	18
Imagen 14. Símbolo amplificador BS bidireccional	19
Imagen 15. Símbolo amplificador BS unidireccional	19
Imagen 16. Símbolo acoplador híbrido	19
Imagen 17. Multicombinador 2. Maestro secundario lado España.....	20
Imagen 18. Multicombinador 3. Maestro secundario lado España	21
Imagen 19. Esquema sistema enlace secundario.....	22
Imagen 20. Esquema general boca España	24
Imagen 21. Rack remoto	25
Imagen 22. Esquema general sistema remoto	25
Imagen 23. Símbolo amplificador BS bidireccional	26
Imagen 24. Símbolo amplificador BS unidireccional	26
Imagen 25. Remoto Multicombinador 1.	27
Imagen 26. Remoto Multicombinador 2	28
Imagen 27. Esquema general sistema remoto	29
Imagen 28. Sistema de captación y enlace principal. Boca Francia	30
Imagen 29. Sistema maestro principal. Lado Francia	32
Imagen 30. Símbolo amplificador canalizado bidireccional.....	33
Imagen 31. Símbolo amplificador canalizado unidireccional.....	33
Imagen 32. Multicombinador 1. Maestro principal lado España	34
Imagen 33. Multicombinador 1. Maestro principal lado España	34
Imagen 34. Rack maestro secundario. Lado Francia	36
Imagen 35. Multicombinador 2. Maestro secundario lado Francia.....	37
Imagen 36. Multicombinador 3. Maestro secundario lado Francia.....	38
Imagen 37. Esquema sistema enlace secundario. Francia.....	39
Imagen 38. Esquema general boca Francia.....	41
Imagen 39. Esquema sistema redundante	43
Imagen 40. Atenuación por curvas [8]	44
Imagen 41. Zona de sombra por obstáculo [8].....	44
Imagen 42. Cobertura lineal con radiante [8].....	44
Imagen 43. Cable radiante. Potencia radiada [8]	45

1 SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES DEL TÚNEL

1.1 Motivación y objetivos

La continua evolución del transporte en carreteras, se traduce en una mejora en infraestructuras viales y en unos requerimientos de seguridad en túneles que son de necesario cumplimiento. Debido desafortunadamente a varios accidentes graves con víctimas mortales ocurridos en túneles europeos, por ejemplo, los accidentes en el túnel de Mont Blanc (Marzo 1999), el de Tauern en Austria (Mayo 1999) o en el túnel de San Gotardo en el sur de Suiza (Octubre 2001), generando una concienciación sobre el impacto de estos accidentes tanto en víctimas como en la propia economía de transporte.

A raíz de estos sucesos, se elaboró la “Directiva 2004/54/ce del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras”. Lo que generó unos años después, el “Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado”, aplicable no solamente a los túneles de la red transeuropea, sino también a todos los túneles de la red vial española. Este Real Decreto incluye 3 anexos, de los cuales serán aplicados en este proyecto el 1 y el 3.

El primer anexo de este Real Decreto, hace referencia a las instalaciones mínimas que deben dotarse los túneles de carretera, teniendo en cuenta la longitud y el volumen de tráfico que soporta. A lo que este proyecto se refiere, este anexo informará de los servicios de radiocomunicaciones que deben ser integrados dependiendo de las características del túnel. Ver resumen en tabla 1 y 2.

El tercer anexo, hace referencia al tipo de señalización en los túneles. Donde según el anexo I sea necesaria la instalación de un sistema de radio, se informará a los usuarios de la frecuencia que se está utilizando mediante una señal antes de la entrada, como la señal de la Imagen 1.

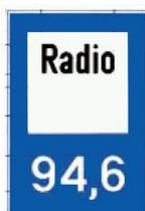


Imagen 1. Señalización Radio

Un aspecto muy importante para cualquier gobierno, es la seguridad en el interior de los túneles en caso de producirse un accidente. Por lo que el objetivo de este proyecto es dotar a un túnel de carretera transeuropea España-Francia, de un sistema de radiocomunicaciones seguro y robusto, para que los servicios de emergencia puedan comunicarse y coordinarse entre sí. También se integrará un sistema para poder insertar mensajes de audio vía FM a las personas que están en el interior de los vehículos en el momento del suceso.

El proyecto contiene la memoria en la que se describe el sistema y 4 anexos, donde se definirán las especificaciones técnicas mínimas de los equipos utilizados, cálculos de atenuaciones y niveles de potencia, planos y esquemas realizados, así como un presupuesto del coste total del sistema que ha sido definido en la memoria.

2 SELECCION DE FRECUENCIAS A UTILIZAR

Basándonos en el “Real Decreto 635/2006, del 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado”, realizamos una tabla resumen del apartado 2.21, “Equipamiento mínimo según la tipología de túnel”. En esta tabla podemos distinguir entre servicios de mensajería, que se refiere a la inserción de mensajes de emergencia modulados en la banda de FM, y los servicios para los sistemas de radiocomunicación, donde hablaremos de las bandas de frecuencias a utilizar por los servicios de emergencia.

Túneles unidireccionales			
	≤ 500m.	500 – 1.000m	> 1.000m
IMD ¹ > 2.000	No obligatorio	Mensajería y sistema radiocomunicación	Mensajería y sistema radiocomunicación
IMD ≤ 2.000	No obligatorio	Mensajería	Mensajería y sistema radiocomunicación

Tabla 1. Resumen requisitos mínimos túneles unidireccionales

Túneles bidireccionales			
	≤ 500m.	500 – 1.000m	> 1.000m
IMD > 1.000	No obligatorio	Mensajería	Mensajería
IMD ≤ 1.000	No obligatorio	Mensajería	Mensajería
IMD > 2.000	No obligatorio	Mensajería	Mensajería y sistema radiocomunicación
IMD ≤ 2.000	No obligatorio	Mensajería	Mensajería

Tabla 2. Resumen requisitos mínimos túneles bidireccionales

Para este proyecto vamos a tener en cuenta el caso más completo, es decir, túneles bidireccionales de más de 1.000 metros con una intensidad media de vehículos (IMD) mayor de 2.000. Por lo tanto habrá que incluir la banda de frecuencia correspondiente a mensajería y las bandas para los sistemas de radiocomunicación de España y Francia.

Como hemos comentado, el túnel discurrirá entre la frontera de España y Francia, por lo tanto a partir de ahora vamos a distinguir entre la parte española, también llamada boca España y la parte francesa también llamada boca Francia.

2.1 Frecuencias boca España

Pasamos a describir las frecuencias que podremos encontrar en el lado español, pertenecientes a las diferentes tecnologías de radio y mensajería que incluiremos en el proyecto.

¹ IMD: Intensidad Media Diaria de vehículos

- Frecuencias FM para radio comercial (87,5 y 108MHz), según UN-17 del CNAF.
 - **Canal 1:** DL: 92.3MHz
 - **Canal 2:** DL: 96.9MHz

- Frecuencias para VHF Protección Civil (146 y 174MHz), según UN-98 del CNAF
 - **Canal 1:** DL: 152.200 MHz - UL:147.600 MHz
 - **Canal 2:** DL: 152.2125 MHz - UL: 147.6125 MHz
 - **Canal 3:** DL: 152.2250 MHz - UL: 147.6250 MHz.

- Frecuencias para las redes de servicios de seguridad de los cuerpos y fuerzas de seguridad del Estado y redes de servicios de emergencia en todo el territorio nacional. En este caso tendremos en cuenta las frecuencias de TETRAPOL, 380-395MHz del Ministerio Interior Español según UN-28 del CNAF.
 - **Canal 1.** DL: 394,350 MHz UL: 384,350 MHz
 - **Canal 2.** DL: 394,200 MHz UL: 384,200 MHz
 - **Canal 3.** DL: 394,650 MHz UL: 384,650 MHz
 - **Canal 4.** DL: 394,500 MHz UL: 384,500 MHz

2.2 Frecuencias boca Francia

En la parte francesa utilizaremos unas frecuencias diferentes a las del lado español, pertenecientes también a las diferentes tecnologías de radio y mensajería que debemos incluir en el proyecto.

- Frecuencias TETRAPOL. Gendarmería Francesa. Sistema Rubí (66 – 87,5 MHz)
 - **Canal 109.** UL: 74,320MHz DL: 78,570MHz
 - **Canal 119.** UL: 74,420MHz DL: 78,670MHz
 - **Canal 129.** UL: 74,520MHz DL: 78,770MHz
 - **Canal 139.** UL: 74,620MHz DL: 78,870MHz

- Frecuencias FM (87,5 y 108MHz).
 - **Canal 1.** DL: 92.3MHz
 - **Canal 2.** DL: 96.0MHz

- Frecuencias ACROPOL (380-395MHz). Departamento de Interior Francés
 - **Canal 1.** DL: 391,8800MHz UL: 381.8800MHz
 - **Canal 2.** DL: 391,8850MHz UL: 381,8850MHz
 - **Canal 3.** DL: 391,6750MHz UL: 381,6750MHz
 - **Canal 4.** DL: 390,6250MHz UL: 380,6250MHz
 - **Canal 5.** DL: 390,8250MHz UL: 380,8250MHz

3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

En este proyecto, se describe un sistema de radiocomunicaciones y de mensajería para servicios de emergencia, con la finalidad de dotar a un túnel de carretera de los elementos necesarios para poder llevar a cabo este cometido.

El túnel tendrá una longitud de 3.000m y, debido a que lo situaremos en la frontera España-Francia, será necesario instalar un sistema de captación en cada una de las bocas del túnel. Con esto se conseguirá dotar de cobertura interior de todos los servicios necesarios de ambos países, permitiendo una correcta coordinación de los diferentes servicios de evacuación.

Debido a la particularidad del sistema, será necesario comunicar ambas bocas del túnel, así como la comunicación de estas a un repetidor que será instalado en el interior del mismo. Con esto se conseguirá una cobertura uniforme en toda la longitud del túnel, así como un sistema redundante, protegido frente a fallos de equipos y cortes de cables.

El sistema de radiocomunicaciones y mensajería del túnel se dividirá en los siguientes puntos:

Boca España: Compuesto por el sistema de captación y enlace principal, maestro principal y secundario, sistema de enlace secundario y sistema de enlace óptico.

Sistema remoto: Lo compondrá el maestro esclavo y el sistema enlace secundario.

Boca Francia: Sistema de captación y enlace principal, maestro principal y secundario, sistema de enlace secundario y sistema de enlace óptico.

Sistema radiante: Compuesto por el cable radiante.

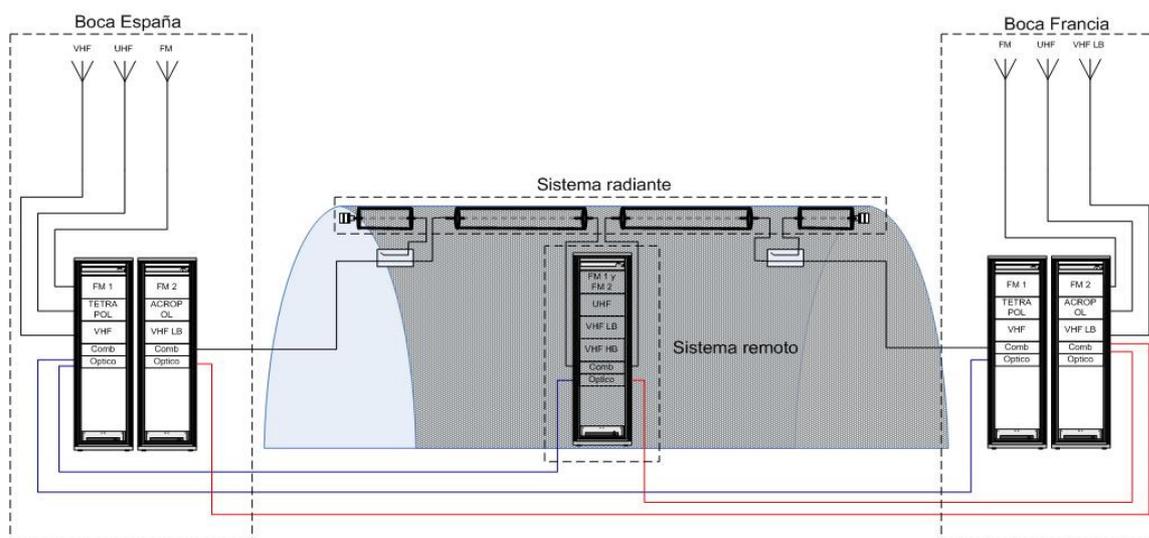


Imagen 2. Arquitectura del sistema

3.1 Boca España

En la boca del túnel correspondiente a la parte española, podemos diferenciar los siguientes elementos y funcionalidades del sistema.

3.1.1 Sistema de captación y enlace principal

El sistema de captación será el encargado de recibir y transmitir las diferentes bandas de frecuencias que se utilizarán en el interior del túnel, enlazando mediante un cable coaxial con los amplificadores bidireccionales canalizados instalados en el rack maestro principal.

El sistema de captación estará compuesto por las antenas necesarias para la correcta recepción de todas las bandas de frecuencia del lado español, junto con los elementos correspondientes para enlazar las antenas con el sistema maestro situ en boca España.

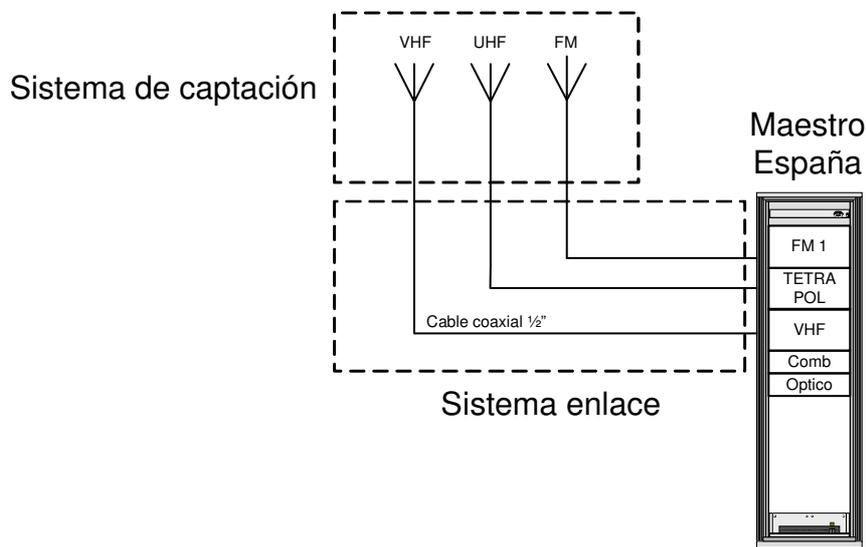


Imagen 3. Sistema de captación y enlace principal

Las antenas serán instaladas en el exterior, ya sea en mástil o ancladas a pared, buscando siempre una solución de compromiso entre la cobertura óptima y una distancia suficiente desde la boca del túnel para evitar la realimentación. Hay que tener en cuenta que el aislamiento mínimo entre la boca del túnel y la antena captadora, será de al menos 15dB superior a la ganancia ajustada en el amplificador. Esto se conseguirá separando la antena captadora, del sistema radiante del túnel. También aumentaremos el aislamiento instalando un acoplador direccional a la entrada del túnel, como explicaremos más adelante en el sistema de enlace secundario.

Utilizaremos las siguientes antenas:

- Banda 87,5-108MHz Modelo FMO de la marca KATHREIN
- Banda 146-174MHz. Modelo K520721 de la marca KATHREIN
- Banda 380-395MHz. Modelo 80010391 de la marca KATHREIN

Todas las antenas anteriores, serán conectadas punto a punto a los amplificadores canalizados bidireccionales de cada una de las tecnologías utilizadas, mediante un cable coaxial de 1/2" modelo LCF12-50J de la marca RFS. Vamos a considerar una distancia de 100 metros en el peor de los casos entre las antenas y los amplificadores canalizados, que serán instalados en el maestro principal. En la siguiente tabla se muestran las pérdidas para el caso peor, en cada una de las bandas de frecuencias utilizadas.

Fabricante/modelo: RFS/LCF12-50J			
Frecuencia (MHz)	108	174	400
Distancia (m)	100	100	100
Atenuación (dB/m total)	2,24	2,87	5,59

Tabla 3. Atenuaciones cable coaxial enlace principal

3.1.2 Maestro principal

Todos los equipos activos y pasivos serán instalados en armarios de 19" y serán ubicados en el lado España, preferiblemente en un recinto con ventilación habilitado para tal uso. Sus principales funciones serán:

1. Recepción/transmisión de las portadoras pertenecientes a las bandas de frecuencias de FM, VHF y TETRAPOL descritas en el punto 2.1 a través del cable coaxial conectado a las antenas.
2. Selección, amplificación y combinación de las portadoras a introducir en el sistema. Estas serán enviadas vía fibra óptica, tanto a los sistemas esclavos de cobertura instalados en el interior del túnel, como al maestro de la boca Francia. A su vez se recogerán las señales generadas por los terminales de usuario, se amplificarán y se enviarán a hacia las estaciones base correspondientes a través de las antenas anteriormente mencionadas.
3. Enlace con el sistema maestro secundario

El sistema maestro principal será el encargado de recibir y seleccionar todas las portadoras de las bandas de frecuencias captadas en la boca España para introducirlas en el sistema de cobertura, así como de recibir las portadoras generadas por los terminales de usuario para enlazar con las estaciones base correspondientes.

Todos los equipos serán instalados en un rack de 19”, que estará compuesto por tantos amplificadores canalizados digitales, como tecnologías necesarias para el sistema de radiocomunicaciones del túnel, los sistemas de combinación necesarios para mezclar correctamente todas las portadoras y un sistema óptico que nos permita enlazar con los equipos remotos instalados en el interior del túnel así como los que se instalarán en la boca opuesta.

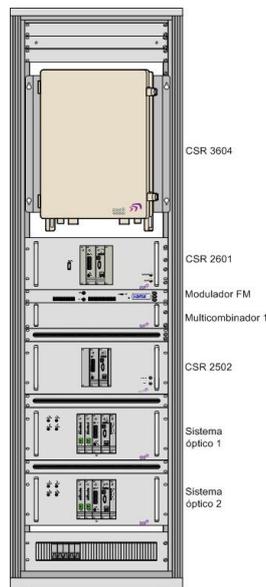


Imagen 4. Sistema maestro principal. Lado España

3.1.2.1 Equipos activos

Llamaremos equipos activos a los amplificadores canalizados bidireccionales y unidireccionales, necesarios para la correcta gestión de todas las portadoras recibidas en la boca España. En este caso utilizaremos los siguientes modelos:

- Modelo CSR 2601 de la marca AXELL Wireless. Amplificador canalizado digital unidireccional para la banda de FM (87,5-108MHz) con capacidad hasta 16 canales. Se incorporará un sistema de modulación de mensajes para la inserción de mensajes de emergencia, el cual será definido en detalle en el anexo.
- Modelo CSR 2502 de la marca AXELL Wireless. Amplificador canalizado digital bidireccional para la banda de VHF (146-174MHz) con capacidad de procesamiento hasta 8 canales.
- Modelo CSR 3604 de la marca AXELL Wireless. Amplificador canalizado bidireccional para la banda de TETRAPOL (380-395MHz) con capacidad de gestión hasta 8 portadoras.

Utilizaremos los siguientes símbolos para los amplificadores canalizados, diferenciando entre los amplificadores unidireccionales y los amplificadores bidireccionales.

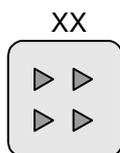


Imagen 5. Símbolo amplificador canalizado unidireccional

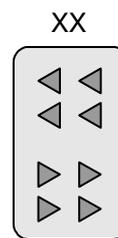


Imagen 6. Símbolo amplificador canalizado bidireccional

3.1.2.2 Equipos pasivos. Multicombinador

El sistema de combinación del rack maestro principal, estará compuesto por varios elementos pasivos, necesarios para la correcta realización de la distribución y combinación de todas las bandas de frecuencia que recibimos y que hay que incluir en el sistema. Este punto es vital, debido a la importancia de evitar los productos de intermodulación y realizar combinaciones con mínimas pérdidas.

Vamos a utilizar los siguientes elementos pasivos para realizar las combinaciones y distribuciones necesarias:

- Acoplador direccional modelo 07-018005 de la marca AXELL Wireless. Un acoplador direccional se trata de un elemento pasivo con 3 puertos. Se inyectará la señal por uno de los puertos, generando una salida directa con prácticamente la totalidad de la potencia de entrada y otra salida con un porcentaje mucho menor. En lo que al rack maestro principal concierne, los acopladores direccionales serán utilizados para gestionar la potencia de las bandas de FM, VHF y TETRAPOL que se inyectará al cable radiante (mayor potencia) y al sistema óptico (menor potencia). A partir de ahora utilizaremos el símbolo siguiente para el acoplador direccional, donde $xxdB$ hará referencia a las pérdidas de acoplo del pasivo

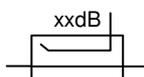


Imagen 5. Símbolo acoplador direccional

- Combinador banda cruzada del fabricante AXELL Wireless. Los combinadores de banda cruzada ó “cross band coupler” se tratan de equipos pasivos que se utilizan para combinar dos bandas de frecuencias diferentes. En el caso del proyecto que nos ocupa, es necesaria la combinación de las bandas de FM, VHF y la banda de UHF (TETRAPOL). Se utilizarán los siguientes modelos:

- Modelo 07-005704. Combinará la banda de FM (87,5-108MHz) y la de VHF (146-174MHz). En este caso, el equipo pasivo tendrá una salida/entrada común para todo el rango de frecuencias, una entrada/salida para el rango comprendido entre 0-108MHz y otra entrada/salida para el rango entre 143-500MHz.
- Modelo 07-005701. Combinará la banda desde 0-250MHz, generada a la salida del combinador anterior, con la banda de UHF de la que pertenece el sistema TETRA. En este caso, el equipo pasivo tendrá una salida/entrada común para todo el rango de frecuencias, una entrada/salida para el rango comprendido entre 0-250MHz y otra entrada/salida para el rango entre 380-1.000MHz.

A partir de ahora utilizaremos el símbolo siguiente para el acoplador direccional, teniendo en cuenta que “>xx MHz” y “<xx MHz” significará el rango de frecuencias que combina.

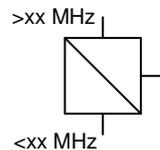


Imagen 6. Símbolo acoplador banda cruzada

- Distribuidor combinador simétrico baja potencia modelo 07-002503 del fabricante AXELL Wireless. Se utilizará para combinar todas las bandas de frecuencia del sistema, antes de atacar a los equipos ópticos o para distribuir las señales a la salida de los mismos. A partir de ahora utilizaremos el siguiente símbolo.

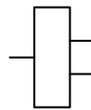


Imagen 7. Símbolo distribuidor/combinador

- Filtros duplexores. Serán utilizados en las bandas de frecuencia de 146-174MHz y 380-395MHz, para separar las sub-bandas correspondientes al uplink del downlink. Para la banda de radiodifusión sonora de FM (87,5-108MHz), no se necesita ningún filtro duplexor, ya que señal solamente se transmite en sentido downlink.
 - Modelo TBC. Utilizado para separar las sub-bandas de DL y UL en la banda de VHF.
 - Modelo 16-005004. Utilizado para separar las sub-bandas de DL y UL en la banda de UHF.

A partir de ahora utilizaremos el siguiente símbolo, donde haremos referencia a cada una de las sub-bandas de frecuencia separadas en UL y en DL.

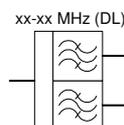


Imagen 8. Símbolo filtros duplexores

Multicombinador 1

Con los pasivos comentados anteriormente, formaremos un multicombinador como el de la siguiente figura, necesario para poder gestionar todas las bandas de frecuencia de una manera eficiente.

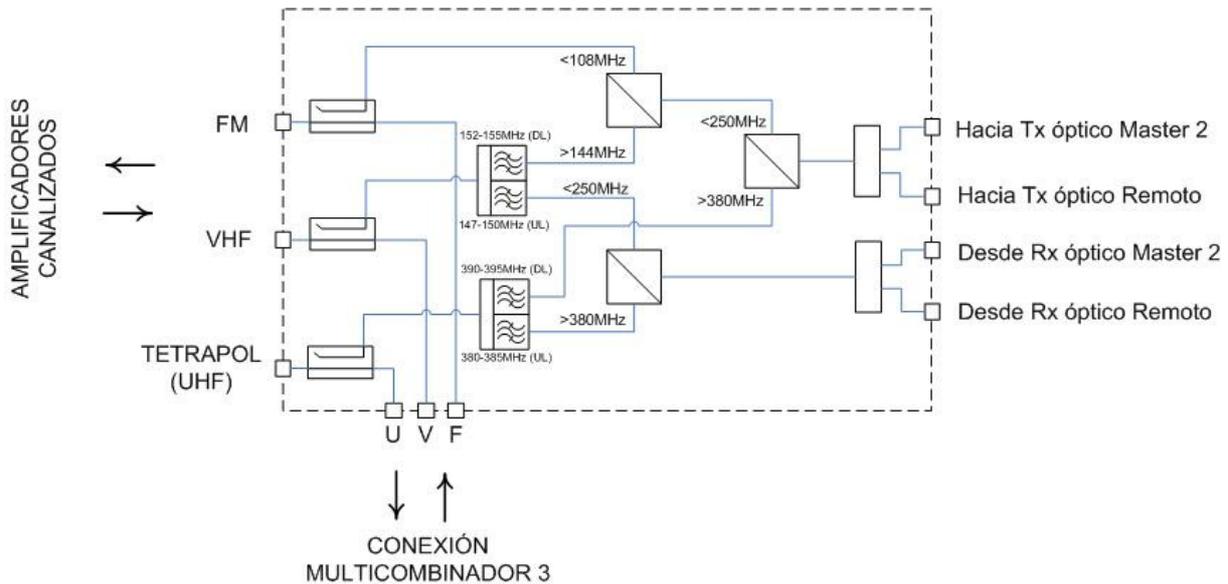


Imagen 9. Multicombinador 1. Maestro principal lado España

Una vez que las portadoras han sido seleccionadas por los amplificadores canalizados, se conectan las salidas de los amplificadores a las entradas del multicombinador 1. El primer elemento del multicombinador es un acoplador direccional, el cual extraerá una muestra de señal que se enviará a los filtros duplexores, donde se separará las señales de UL y de DL. Una vez separadas todas las bandas de frecuencia, se procederá a su combinación mediante los acopladores de banda cruzada, donde conseguiremos tener todas las señales combinadas y separadas en DL y UL. El último paso de este multicombinador, será un distribuidor-combinador simétrico de baja potencia, para finalmente conseguir dos salidas simétricas que serán enviadas a los equipos ópticos, así como a su vez recibirán vía fibra óptica las señales provenientes del master de la boca opuesta y del remoto óptico.

El acoplador direccional comentado anteriormente, tendrá una salida con prácticamente la totalidad de la potencia de entrada. Estas señales se utilizarán en el rack maestro secundario para que sean combinadas e inyectadas hacia el cable radiante, por lo tanto se conectarán directamente con el multicombinador 3.

En las siguientes tablas podemos observar las diferentes atenuaciones que se aplicaran a cada una de las bandas de frecuencias al paso por este multicombinador, diferenciando entre UL y DL, así como entre la conexión al sistema óptico ó hacia el sistema radiante. Los cálculos de las atenuaciones pueden consultarse en los anexos adjuntos a este proyecto.

Atenuaciones multicombinador 1 sentido downlink

Frecuencia (MHz)	FM	VHF	UHF
Pérdidas conexión multicombinador 3 (dB)	1,0	1,0	1,0
Pérdidas hacia equipos ópticos (dB)	34,5	36,5	35,1

Tabla 4. Atenuaciones totales multicombinador 1 España. DL

Atenuaciones multicombinador 1 sentido uplink

Frecuencia (MHz)	VHF	UHF
Pérdidas conexión multicombinador 3 (dB)	36,5	35,1
Pérdidas hacia equipos canalizados (dB)	1,0	1,0

Tabla 5. Atenuaciones totales multicombinador 1 España. UL

3.1.2.3 Sistema óptico

El rack maestro principal se completará con el sistema óptico, necesario para enlazar tanto con los amplificadores remotos instalados en el interior del túnel, como con los amplificadores a instalar en la boca Francia.

Podemos distinguir entre dos sistemas ópticos:

- Sistema óptico 1. Compuesto por dos transmisores ópticos modelo 20-004001 del fabricante AFL, y dos receptores ópticos 20-004101 del mismo fabricante, cuyas señales serán combinadas/separadas por un multiplexor/demultiplexor óptico por longitud de onda (WDM) modelo BWMR 1310/1550 del fabricante KATHREIN. Con esto se conseguirá combinar las comunicaciones de DL y de UL en una sola fibra óptica. Este sistema enviará y recibirá las señales captadas en la boca España hacia los repetidores de banda selectiva instalados en la boca Francia. También enlazará directamente con los equipos instalados en el interior del túnel.
- Sistema óptico 2. Al igual que en el caso anterior, ambas señales serán combinadas en una sola fibra óptica aunque en este caso solamente necesitaremos un transmisor un receptor óptico. Este sistema recibirá y transmitirá directamente las señales captadas en la parte francesa.

Se utilizará el símbolo siguiente como referencia al conjunto óptico compuesto por un transmisor, un receptor y un multiplexor WDM.

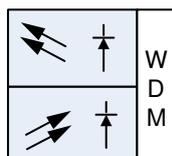


Imagen 10. Símbolo Tx y Rx óptico + multiplexor

3.1.3 Maestro secundario

Igual que en el caso anterior, todos los equipos activos y pasivos serán instalados en armarios de 19" y serán ubicados en el lado España junto al rack maestro principal. Sus principales funciones serán:

1. Recepción/transmisión vía fibra óptica de las portadoras pertenecientes a las bandas de frecuencia captadas en la boca Francia.
2. Amplificación mediante equipos de banda selectiva de dichas portadoras
3. Combinación de todas las portadoras captadas en la boca Francia y la boca España, antes de ser enviadas al sistema de enlace secundario.

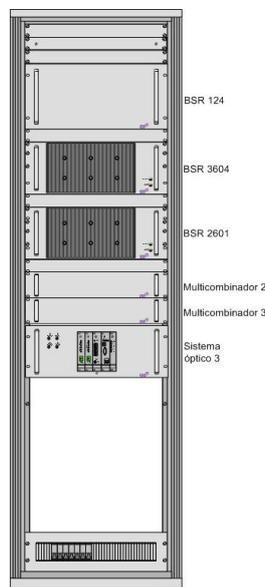


Imagen 11. Rack maestro secundario. Lado España

3.1.3.1 Equipos activos

En este caso y a diferencia del sistema principal, todos los equipos activos instalados serán banda selectiva, es decir, se amplificará toda la banda entera de cada una de las tecnologías del sistema.

Utilizaremos los siguientes modelos de amplificadores bidireccionales y unidireccionales banda selectiva.

- Modelo BSR 124 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva bidireccional para la banda de VHF banda baja (66-87,5MHz).
- Modelo BSR 2601 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva unidireccional para la banda de FM (87,5-108MHz).

- Modelo BSR 3604 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva unidireccional para la banda de ACROPOL (380-395MHz).

Los anteriores equipos, amplificarán todas las bandas de frecuencias captadas en la boca Francia y que han sido enviadas hasta este maestro secundario a través de la fibra óptica. A su vez, se recibirán todas las frecuencias correspondientes a las comunicaciones UL de los terminales de usuario utilizados en el interior del túnel, y se enviarán hacia los amplificadores canalizados de la parte francesa por la misma fibra óptica.

Utilizaremos el siguiente símbolo para los equipos amplificadores banda selectiva, diferenciando entre los amplificadores unidireccionales como en el caso de los de FM y de los amplificadores bidireccionales como el resto.

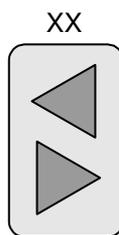


Imagen 12. Símbolo amplificador BS bidireccional



Imagen 13. Símbolo amplificador BS unidireccional

3.1.3.2 Equipos pasivos. Multicombinador

En el sistema de combinación del rack maestro secundario, podemos diferenciar dos tipos de multicombinadores, compuestos por pasivos “cross band coupler”, ya explicados en el punto anterior, y de acopladores híbridos de 3dB.

Los acopladores híbridos los utilizaremos para combinar o dividir portadoras o canales muy próximos en frecuencia. Por ejemplo serán utilizados para combinar/separar las bandas de frecuencia de VHF_banda baja (66-87,5MHz) con la de FM (87.5-108MHz), también serán perfectamente válidos para combinar las señales de FM captadas en ambas bocas del túnel, así como para combinar/separar las portadoras de ACROPOL del departamento del interior francés, con las portadoras de TETRAPOL del ministerio del interior español, ambas en la banda de 380-395MHz.

Utilizaremos el símbolo siguiente con una de las salidas cerrada con una carga de 50Ω.

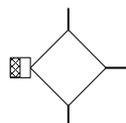


Imagen 14. Símbolo acoplador híbrido

En el sistema maestro secundario, distinguiremos entre dos sistemas de multicombinación compuestos por los pasivos anteriores.

Multicombinador 2

Este multicombinador será el encargado de recibir y transmitir todas las bandas de frecuencia captadas en el master principal del lado francés, y de enlazar con los amplificadores banda selectiva instalados en el rack maestro secundario.

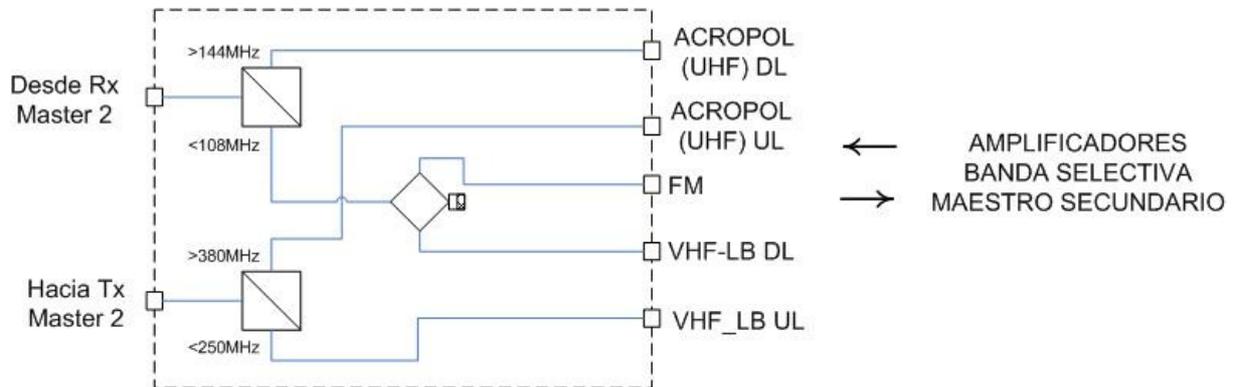


Imagen 15. Multicombinador 2. Maestro secundario lado España

En las siguientes tablas podemos observar un resumen de las atenuaciones que se aplicarán a cada una de las bandas de frecuencia, tanto en sentido UL como en DL.

Atenuaciones multicombinador 2 sentido downlink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	FM	UHF
Pérdidas combinación hacia amp banda selectiva (dB)	4,0	4,0	0,5

Tabla 6. Atenuaciones totales multicombinador 2 España. DL

Atenuaciones multicombinador 2 sentido uplink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	UHF
Pérdidas hacia equipos ópticos (dB)	4,0	0,5

Tabla 7. Atenuaciones totales multicombinador 2 España. UL

Multicombinador 3

En el sentido DL, la función principal del multicombinador 3 será la de combinar la totalidad de portadoras recibidas tanto en el lado español como las del lado Francés, antes de ser enviadas al sistema de enlace secundario y este a su vez al cable radiante.

En el sentido UL, recibirá todas las comunicaciones cursadas desde los terminales de usuario, todas ellas combinadas en el cable coaxial, por lo que será necesario proceder a su separación espectral para que sean enviadas hacia los equipos canalizados de la boca España o de la boca Francia, dependiendo de la banda de frecuencia.

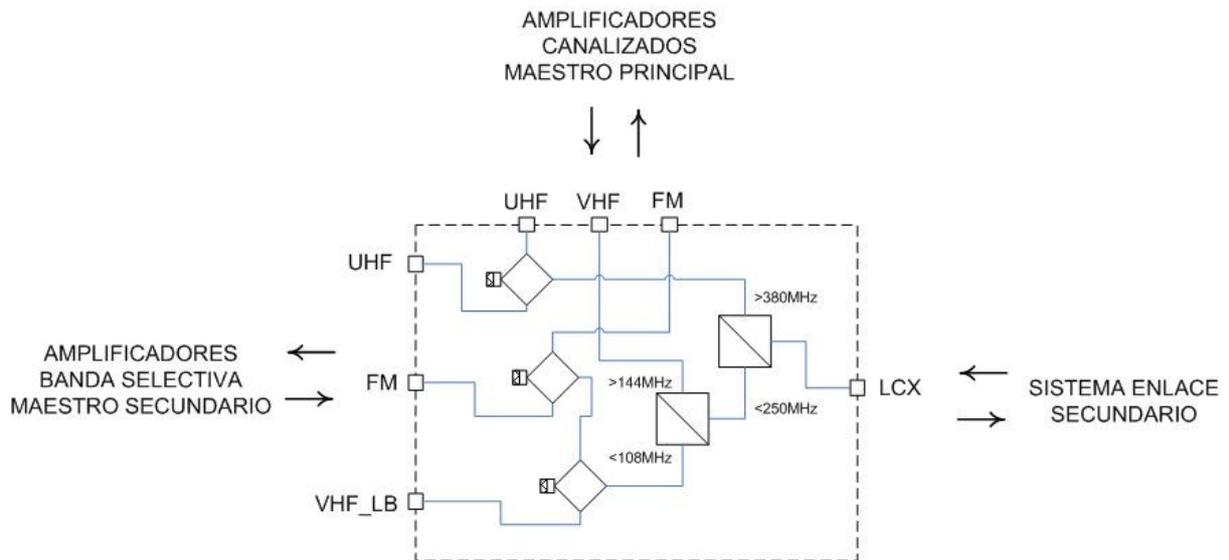


Imagen 16. Multicombinador 3. Maestro secundario lado España

Las siguientes tablas muestran las atenuaciones calculadas para cada una de las bandas de frecuencia que son combinadas y distribuidas en este multicombinador

Atenuaciones multicombinador 3 sentido downlink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	FM	VHF	UHF
Pérdidas combinación hacia enlace secundario (dB)	4,5	8,0	1,0	4,0

Tabla 8. Atenuaciones totales multicombinador 3 España. DL

Atenuaciones multicombinador 3 sentido uplink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	VHF	UHF
Pérdidas hacia multicombinador 1 y hacia amplificadores banda selectiva (dB)	4,5	1,0	4,0

Tabla 9. Atenuaciones totales multicombinador 3 España. UL

3.1.3.4 Sistema óptico

El sistema óptico del maestro secundario, tiene la función de recibir todas las portadoras procedentes de la parte francesa. Tras realizar la conversión óptico-eléctrica, pasará todo el espectro recibido a los amplificadores de banda selectiva del rack secundario. A su vez, en el sentido contrario, recibirá las portadoras amplificadas en UL para ser enviadas vía fibra óptica al maestro principal de Francia. En este caso el sistema óptico estará compuesto por un transmisor, un receptor óptico y un mutiplexor WDM, con las mismas características que hemos comentado anteriormente.

3.1.4 Sistema de enlace secundario.

El sistema de enlace secundario está compuesto por un cable coaxial, que enlazará con un acoplador direccional instalado en la boca del túnel, y este a su vez alimentará a dos secciones del cable radiante. La función principal será transportar todas las frecuencias del sistema de radiocomunicaciones y de radio comercial hasta el sistema radiante y viceversa.

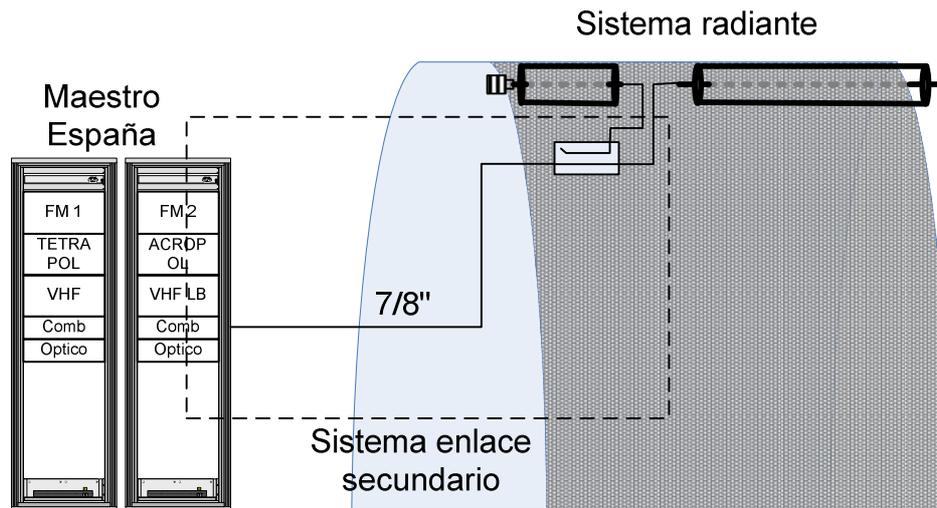


Imagen 17. Esquema sistema enlace secundario

Describiendo en detalle el sistema de enlace secundario, este comenzará a la salida del multicombinador 3, donde tendremos todo el espectro del sistema combinado en una única salida. Se conectará mediante un cable coaxial de 7/8" al acoplador direccional instalado en la boca del túnel.

La función del acoplador direccional será muy importante, ya que nos permitirá aumentar el aislamiento entre las frecuencias transmitidas en el interior del túnel, de las que se recibirán directamente del exterior. El acoplador se instalará a 15 metros de la entrada con un valor de pérdidas de acoplo de 30dB, con esto nos aseguraremos suficiente señal para cubrir el primer tramo del túnel y un aislamiento lo suficientemente elevado para evitar las realimentaciones. La salida directa del acoplador direccional se conectará al cable radiante para cubrir la primera parte del túnel.

Para este caso, vamos a suponer una distancia de 100 metros entre el multicombinador 3 hasta el acoplador direccional instalado en la boca del túnel.

Fabricante/modelo: RFS/LCF78-50JA				
Frecuencia (MHz)	88	108	174	400
Distancia (m)	100	100	100	100
Atenuación (dB/m total)	1,07	1,19	1,53	2,38

Tabla 10. Atenuaciones cable coaxial enlace secundario

3.1.5 Niveles de señal boca España

La siguiente tabla muestra un resumen de niveles de potencia en varios puntos del maestro principal y secundario de la boca España. Donde se han tenido en cuenta las ganancias de los equipos activos, así como las atenuaciones introducidas por cable coaxial o por la combinación y distribución de las diferentes bandas de frecuencia. Hay que tener en cuenta que los niveles elegidos en captación son totalmente orientativos.

Descripción	VHF_LB	FM	FM2	VHF	TETRP	ACROP
Nivel de señal en antena (dBm)		-70		-75	-76	
Ganancia antena (dB)		0,5		10,5	9,2	
Atenuación cable 1/2" (dB/100m)		2,24		2,87	5,59	
Nivel entrada amplificador canalizado (dBm)		-71,74		-67,37	-72,39	
Ganancia amplificador canalizado (dB)		95		95	90	
Nivel salida amplificador canalizado (dBm)		23,26		27,63	17,61	
Pérdidas combinador 1. Sistema óptico (dB)		34,5		36,5	35,1	
Pérdidas combinador 1. Radiante (dB)		1		1	1	
Pérdidas combinador 2 (dB)	4	4	4	4	0,5	0,5
Pérdidas combinador 3 (dB)	4,5	8	8	4,5	1	4
Pérdidas enlace óptico - cable + equipos (dB)	21,5		21,5			21,5
Nivel entrada multicombinador 2 (dBm)	-13,52		-12,2			-11,49
Nivel entrada amplificador banda selectiva (dBm)	-39,02		-37,7			-33,49
Ganancia amplificador banda selectiva (dB)	60		60			60

Potencia salida enlace secundario (dBm)	20,98	14,26	22,3	22,13	15,61	26,51
Hacia TX óptico (dBm)		-11,24		-8,87	-17,49	

Tabla 11. Cálculo niveles Master España

Esta tabla mostrará los niveles de potencia que serán inyectados al cable radiante, alimentando las dos secciones. La primera cubrirá el tramo hasta remoto instalado en el interior del túnel, y la segunda dará cobertura a la propia boca.

Descripción	VHF_LB	FM	FM2	VHF	TETRP	ACROP
Nivel de salida multicombinador 3 (dBm)	20,98	14,26	22,3	22,13	15,61	26,51
Atenuación cable 7/8" (100m)	1,07	1,19	1,19	1,53	2,38	2,38
Entrada Acoplador direccional	19,91	13,07	21,1	20,6	13,23	24,13
Pérdidas directas acoplador direccional	1	1	1	1	1	1
Pérdidas de acoplo acoplador direccional	30	30	30	30	30	30

Potencia de partida cable radiante (dBm)	18,91	12,07	20,1	19,6	12,23	23,13
Potencia de partida cable radiante_boca (dBm)	-10,09	-16,93	-8,93	-9,4	-16,77	-5,87

Tabla 12. Niveles de señal enlace secundario boca España

3.1.6 Esquema general boca España

Resumiendo lo comentado anteriormente, se muestra en el siguiente diagrama de bloques el conexionado de las diferentes secciones que componen la arquitectura del sistema de radiocomunicaciones y del sistema de mensajería de emergencia de la boca España. Ofrecemos una visión global del sistema de captación y de los diferentes equipos amplificadores que se van a utilizar, tanto de los canalizados como de los amplificadores banda selectiva, así como el conexionado y las combinaciones-distribuciones de las diferentes bandas de frecuencias. Es necesario hacer especial hincapié en los multicombinadores comentados en puntos anteriores, ya que se han realizado agrupaciones de pasivos en 3 equipos diferentes, así como la ordenación de todos los equipos en dos armarios diferenciados. Esto se ha realizado con el único interés de componer un sistema lo más comprensible posible, tanto a la hora de la puesta en marcha como en su posterior mantenimiento.

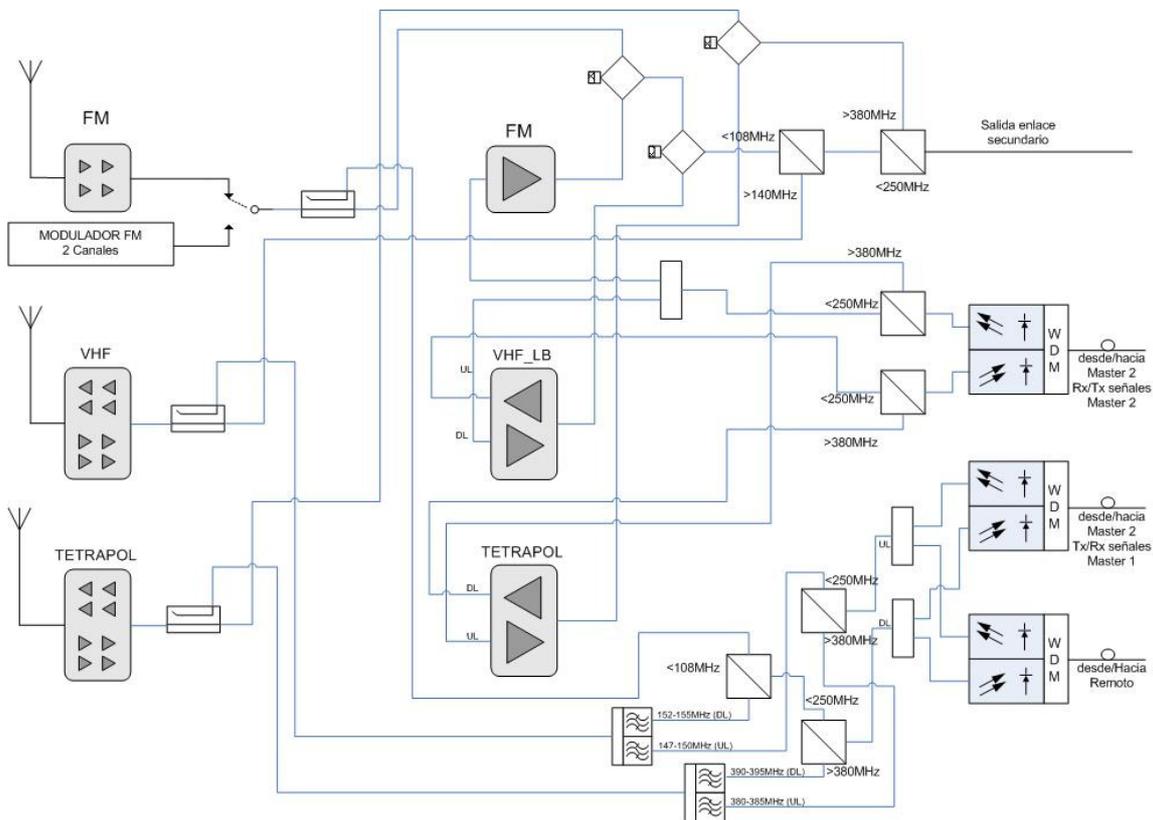


Imagen 18. Esquema general boca España

3.2 Sistema remoto

Todos los equipos activos y pasivos serán instalados en un armario de 19" situado en el interior del túnel, en este caso decidiremos instalar un sistema remoto justo en el centro.

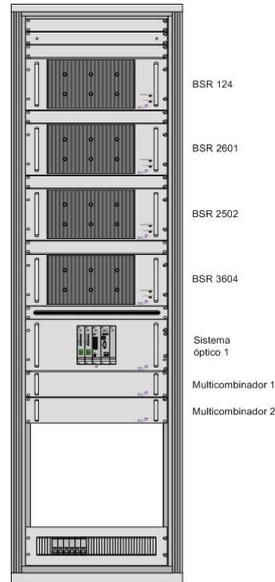


Imagen 19. Rack remoto

Las principales funciones del sistema remoto serán:

1. Recibir todas las portadoras captadas en ambas bocas del túnel mediante fibra óptica, y a su vez transmitir las comunicaciones generadas en el interior del mismo hacia los rack maestros principales.
2. En sentido downlink se combinarán todas las frecuencias antes de ser inyectadas al cable radiante para dotar de cobertura al interior del túnel y en sentido uplink se separarán las diferentes bandas antes de ser amplificadas.

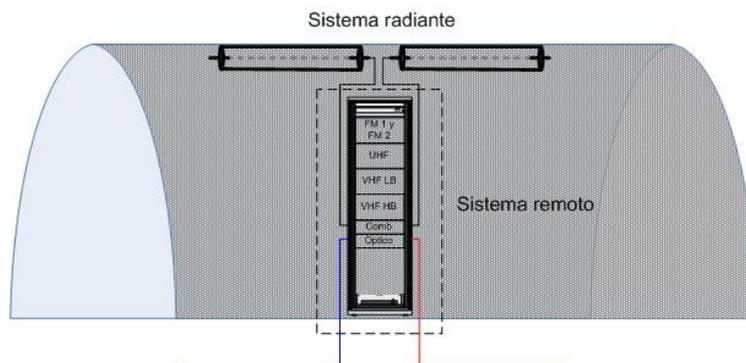


Imagen 20. Esquema general sistema remoto

3.2.1 Equipos activos

Todos los equipos activos que componen el sistema remoto, serán amplificadores banda selectiva, ya que en sentido downlink las portadoras ya han sido filtradas por los equipos canalizados de cada una de las bocas. En sentido uplink, los terminales solamente transmitirán las frecuencias utilizadas en el sistema, por lo tanto no es necesario realizar otro filtrado.

Se utilizarán los siguientes modelos de amplificadores bidireccionales y unidireccionales banda selectiva.

- Modelo BSR 124 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva bidireccional para la banda de VHF banda baja (66-87,5MHz).
- Modelo BSR 2601 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva unidireccional para la banda de FM (87,5-108MHz).
- Modelo BSR 2502 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva bidireccional para la banda de VHF (148-174MHz).
- Modelo BSR 3604 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva unidireccional para la banda de ACROPOL (380-395MHz).

Se han creado los siguientes símbolos para los equipos amplificadores banda selectiva, diferenciando entre los amplificadores unidireccionales, como en el caso de los de FM y de los amplificadores bidireccionales como el resto.



Imagen 21. Símbolo amplificador BS bidireccional



Imagen 22. Símbolo amplificador BS unidireccional

Como se tratan de equipos banda selectiva que amplifican la banda de frecuencia completa, hay que tener en cuenta que podemos utilizarlos para amplificar las portadoras recibidas en ambas bocas del túnel, siempre y cuando estén dentro de la misma sub-banda. Es decir, en cada una de las bocas del túnel se reciben portadoras diferentes de FM y de UHF (TETRAPOL y ACROPOL), pero en el sistema remoto solamente será necesaria la utilización de un equipo amplificador para cada una de estas bandas de frecuencias, ya que antes de pasar por los amplificadores son combinadas.

3.2.2 Equipos pasivos. Multicombinador

El sistema de combinación de los equipos que componen el sistema remoto, estará compuesto por dos multicombinadores formados a su vez por los dispositivos pasivos que han sido descritos previamente.

Multicombinador 1

En el camino downlink, la función principal de este multicombinador será la de recibir de los sistemas ópticos, todas las portadoras que han sido captadas en ambas bocas. Una vez combinadas serán enviadas hacia los amplificadores de banda selectiva.

En el sentido uplink, se recibirán todas las portadoras generadas en el interior del túnel y que previamente han pasado por los amplificadores banda selectiva. Las frecuencias son combinadas y distribuidas antes de pasar a los sistemas ópticos.

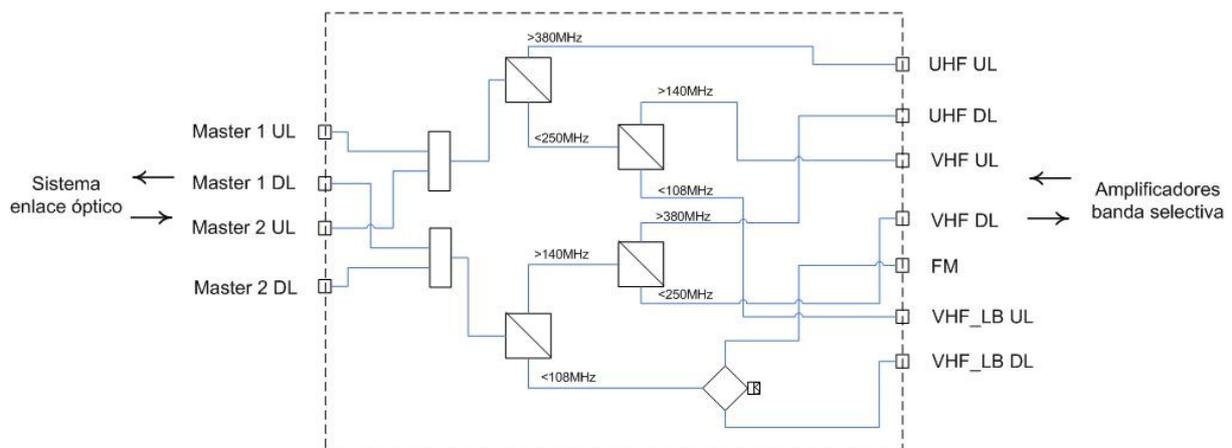


Imagen 23. Remoto Multicombinador 1.

Se han calculado las atenuaciones que se producirán en cada una de las bandas de frecuencia tanto en sentido downlink como en uplink.

Atenuaciones multicombinador 1 sentido downlink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	FM	VHF	UHF
Pérdidas combinación hacia amp banda selectiva (dB)	7,5	7,5	4,5	3,5

Tabla 13. Atenuaciones totales multicombinador 1 Remoto. DL

Atenuaciones multicombinador 1 sentido uplink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	VHF	UHF
Pérdidas hacia equipos ópticos (dB)	4,5	4,5	3,5

Tabla 14. Atenuaciones totales multicombinador 1 Remoto. UL

Multicombinador 2

En este multicombinador, todas las frecuencias recibidas en downlink de los amplificadores banda selectiva, son combinadas en un único espectro y divididas a su vez en dos salidas simétricas, consiguiendo las dos acometidas necesarias para la conexión al sistema radiante.

En el sentido uplink, se recibirán todas las portadoras generadas en el interior del túnel, se combinarán y se enviarán hacia los amplificadores de banda selectiva.

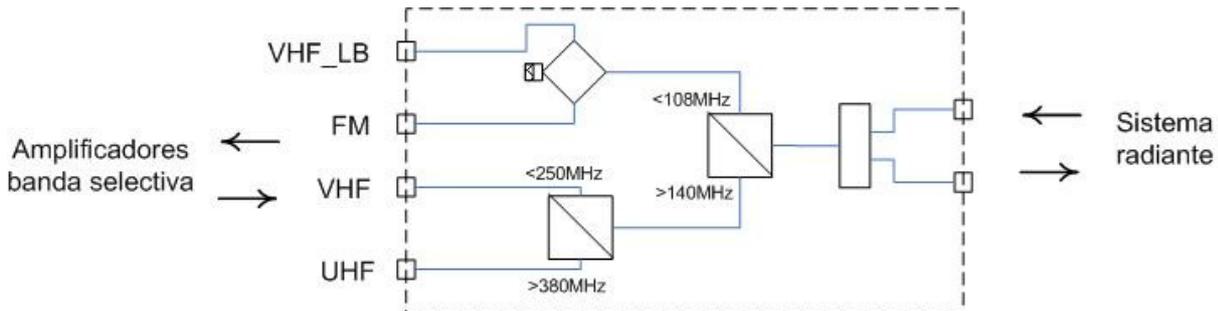


Imagen 24. Remoto Multicombinador 2

En la siguiente tabla se observan los resultados de las atenuaciones que sufrirán las portadoras de cada una de las bandas de frecuencias que se utilizan

Atenuaciones multicombinador 2 sentido downlink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	FM	VHF	UHF
Pérdidas combinación hacia amp banda selectiva (dB)	7,5	7,5	4,5	4,5

Tabla 15. Atenuaciones totales multicombinador 2 Remoto. DL

Atenuaciones multicombinador 2 sentido uplink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	VHF	UHF
Pérdidas hacia equipos ópticos (dB)	7,5	4,5	4,5

Tabla 16. Atenuaciones totales multicombinador 2 Remoto. UL

3.2.3 Niveles de señal sistema remoto

A continuación mostraremos una tabla resumen, con los niveles de potencia teóricos que serán inyectados al cable radiante. Para realizar estos cálculos, se han tenido en cuenta todas las pérdidas de combinación y distribución comentadas en los puntos anteriores, así como las ganancias de los amplificadores y los niveles de señal recibidos de ambas partes del túnel.

Descripción	VHF_LB	FM	FM2	VHF	TETRP	ACROP
Potencia entrada óptica (dBm)	-13,52	-11,24	-12,2	-8,87	-17,49	-11,49
Atenuación enlace óptico (fibra+equipos)	20,75	20,75	20,8	20,75	20,75	20,75
Pérdidas multicombinador 1 (dB)	7,5	7,5	7,5	4,5	4,5	4,5
Ganancia amplificadores banda selectiva (dB)	60	60	60	60	60	60
Pérdidas multicombinador 2 (dB)	7,5	7,5	7,5	4,5	4,5	4,5

Potencia salida sistema radiante (dBm)	10,73	13,01	12	21,38	12,76	18,76
----------------------------------------	--------------	--------------	-----------	--------------	--------------	--------------

Tabla 17. Niveles de señal sistema remoto

3.2.4 Esquema general sistema remoto

Realizando una agrupación de todo lo comentado anteriormente, configuramos el siguiente diagrama de bloques donde puede observarse las diferentes secciones del sistema remoto. Se ofrece una visión global del sistema óptico y de los diferentes equipos amplificadores de banda selectiva que se van a utilizar, así como el conexionado y las combinaciones-distribuciones de las diferentes bandas de frecuencias para que el sistema funcione correctamente.

Como puede observarse en la siguiente figura, serán necesarios dos sistemas de combinación: uno para gestionar las portadoras que se reciben y se envían a los sistemas ópticos y el otro para combinar y distribuir las señales que se envían y se reciben del cable radiante. Estos sistema de combinación ya han sido previamente explicados y unificados en dos multicombinadores.

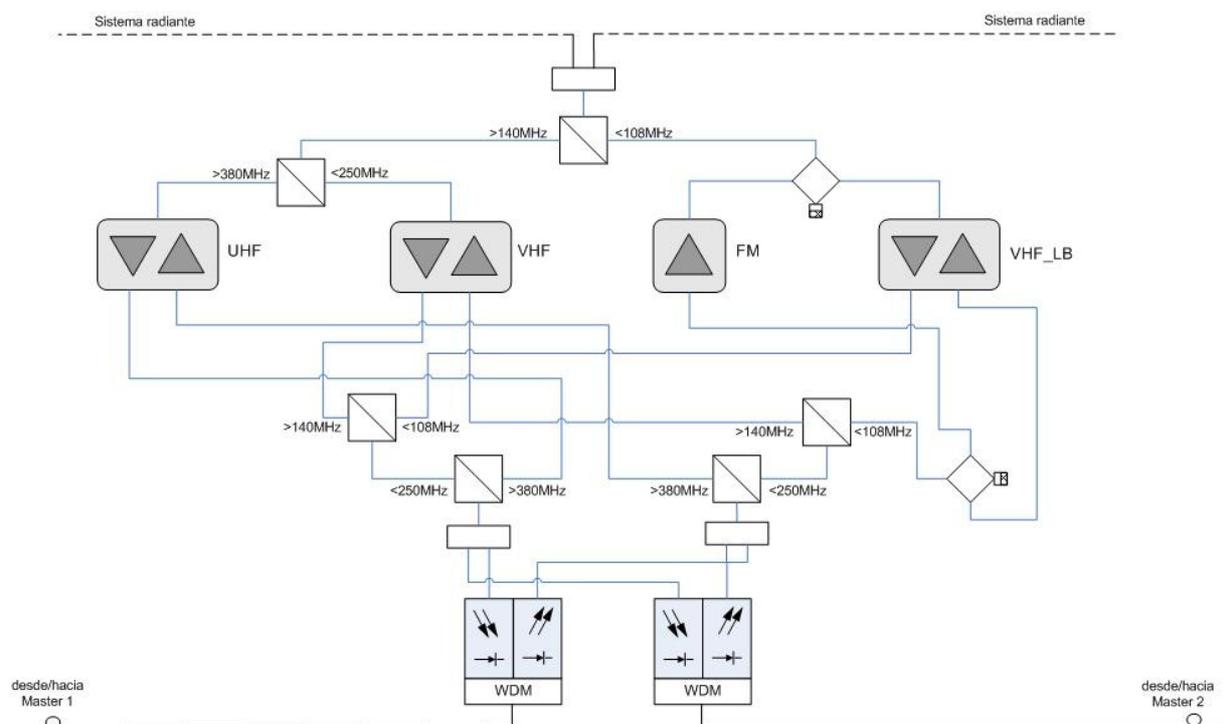


Imagen 25. Esquema general sistema remoto

3.3 Boca Francia

En la boca Francia diferenciaremos los elementos y funcionalidades siguientes:

3.3.1 Sistema de captación y enlace principal

El sistema de captación se utilizará para recibir y transmitir todas las bandas de frecuencias que son necesarias inyectar al interior del túnel. También enlazará con el maestro principal mediante un cable coaxial que describiremos posteriormente.

El sistema de captación estará compuesto por las antenas necesarias para la correcta recepción de todas las bandas de frecuencia del lado francés, junto con los elementos correspondientes para enlazar las antenas con el sistema maestro situ en boca Francia.

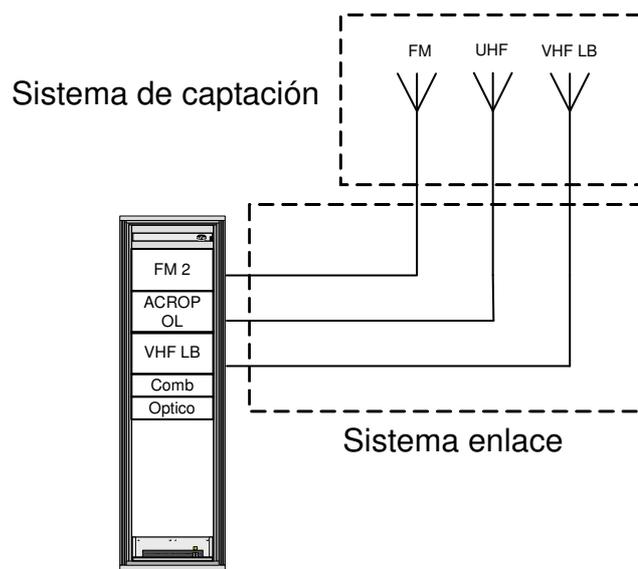


Imagen 26. Sistema de captación y enlace principal. Boca Francia

Igual que en el caso de la parte española, las antenas deben ser instaladas en el exterior, ya sea en mástil o ancladas a pared. Siempre buscando una solución de compromiso entre la cobertura óptima, y una distancia suficiente desde la boca del túnel para evitar la realimentación.

En este caso serán seleccionadas las siguientes antenas:

- Banda 68-87,5MHz. Modelo K531741 de la marca KATHREIN
- Banda 87,5-108MHz Modelo FMO de la marca KATHREIN
- Banda 380-395MHz. Modelo 80010391 de la marca KATHREIN

Todas las antenas anteriores, serán conectadas punto a punto a los amplificadores canalizados bidireccionales de cada una de las tecnologías utilizadas. Se instalará un cable coaxial de 1/2" modelo LCF12-50J de la marca RFS.

Vamos a considerar una distancia de 100 metros en el peor de los casos entre las antenas y los amplificadores canalizados, instalados en el maestro principal. En la siguiente tabla se muestran las pérdidas en el peor caso para cada una de las bandas de frecuencias.

Fabricante/modelo: RFS/LCF12-50J			
Frecuencia (MHz)	108	174	400
Distancia (m)	100	100	100
Atenuación (dB/m total)	2,24	2,87	5,59

Tabla 18. Atenuaciones cable coaxial enlace principal

Un punto muy importante que hay que tener en cuenta a la hora de realizar la instalación en el lado de Francia, es la separación entre las antenas de VHF_LB y de FM. Debido a la proximidad de las frecuencias, es necesario realizar la instalación con una separación de al menos 1λ (longitud de onda) si la instalación se hace en vertical o de 4λ , si la instalación se hace en horizontal. Con esto se conseguirá un aislamiento de al menos 30dB entre las antenas, evitando posibles realimentaciones. Por ejemplo para este caso y para la frecuencia común de 87,5MHz será necesario una separación de las antenas de:

$$\lambda = C / f \text{ (Hz)} \rightarrow \lambda = 3 \times 10^8 / 87,5 \times 10^6$$

$\lambda = 3,43\text{m}$

Por lo tanto, será necesaria una separación entre la antena de VHF_LB y la de FM de 3,43 metros si se realiza una instalación en vertical, y de 13,71 metros si se realiza una instalación en horizontal.

3.3.2 Maestro principal

Para mantener una continuidad con la parte española y para conseguir un sistema compacto, todos los equipos activos y pasivos serán instalados también en armarios de 19". Estos han de ser ubicados en la parte Francesa, preferiblemente en un lugar seco y con ventilación. Sus principales funciones serán:

1. Recepción/transmisión de las portadoras pertenecientes a las bandas de frecuencias de VHF banda baja, FM y ACROPOL descritas en el punto 2.2. Conectándose punto a punto al maestro principal mediante cables coaxiales.
2. Selección, amplificación y combinación de las portadoras a introducir en el sistema. Estas serán enviadas vía fibra óptica tanto a los sistemas esclavos de cobertura instalados en el interior del túnel, como al maestro de la parte Española. A su vez se recogerán las señales generadas en el interior del túnel, se amplificarán y se enviarán a hacia las estaciones base correspondientes a través de las antenas anteriormente mencionadas.
3. Enlace con el sistema maestro secundario

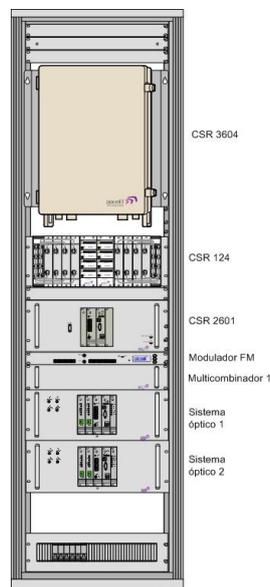


Imagen 27. Sistema maestro principal. Lado Francia

El sistema maestro principal, será el encargado de recibir y seleccionar todas las portadoras de las bandas de frecuencias captadas en la boca Francia, así como de recibir las portadoras generadas por los terminales de usuario para enlazar con las estaciones base correspondientes.

Todos los equipos serán instalados en un rack de 19", que estará compuesto por tantos amplificadores canalizados digitales, como tecnologías necesarias para el sistema de radiocomunicaciones del túnel. También deben ser incluidos los sistemas de combinación necesarios para mezclar correctamente todas las portadoras y un sistema óptico que nos permita enlazar con los equipos remotos instalados en el interior del túnel, así como los que se instalarán en la boca opuesta.

3.3.2.1 Equipos activos

En este caso son necesarios los siguientes amplificadores canalizados bidireccionales y unidireccionales:

- Modelo CSR 124 de la marca AXELL Wireless. Amplificador canalizado analógico bidireccional para la banda de VHF banda baja (66-87,5MHz) con capacidad de procesamiento hasta 4 canales.
- Modelo CSR 2601 de la marca AXELL Wireless. Amplificador canalizado digital unidireccional para la banda de FM (87,5-108MHz) con capacidad hasta 16 canales. Se incorporará un sistema de modulación de mensajes para la inserción de mensajes de emergencia, el cual es definido en detalle en el punto xxx.
- Modelo CSR 3604 de la marca AXELL Wireless. Amplificador canalizado bidireccional para la banda de TETRAPOL (380-395MHz) con capacidad de gestión hasta 8 portadoras.

La simbología que se utilizará para estos equipos será la misma que para los descritos en la boca España

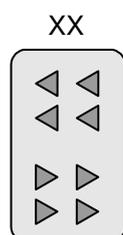


Imagen 28. Símbolo amplificador canalizado bidireccional

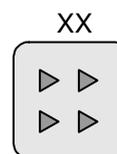


Imagen 29. Símbolo amplificador canalizado unidireccional

3.3.2.2 Equipos pasivos. Multicombinador

El sistema de combinación del rack maestro principal estará compuesto por tanto elementos pasivos como sean necesarios, componiendo un multicombinador compacto enracable en un armario de 19”.

Igual que en el caso anterior, este multicombinador estará compuesto por los siguientes pasivos ya descritos: 3 acopladores direccionales, 2 filtros duplexores, 2 acopladores de banda cruzada, 1 acoplador híbrido de 3dB, y 2 distribuidores/combinadores simétricos.

Multicombinador 1

Con los pasivos comentados anteriormente, formaremos un multicombinador como el de la siguiente figura, necesario para combinar y distribuir todas las portadoras recibidas en este punto.

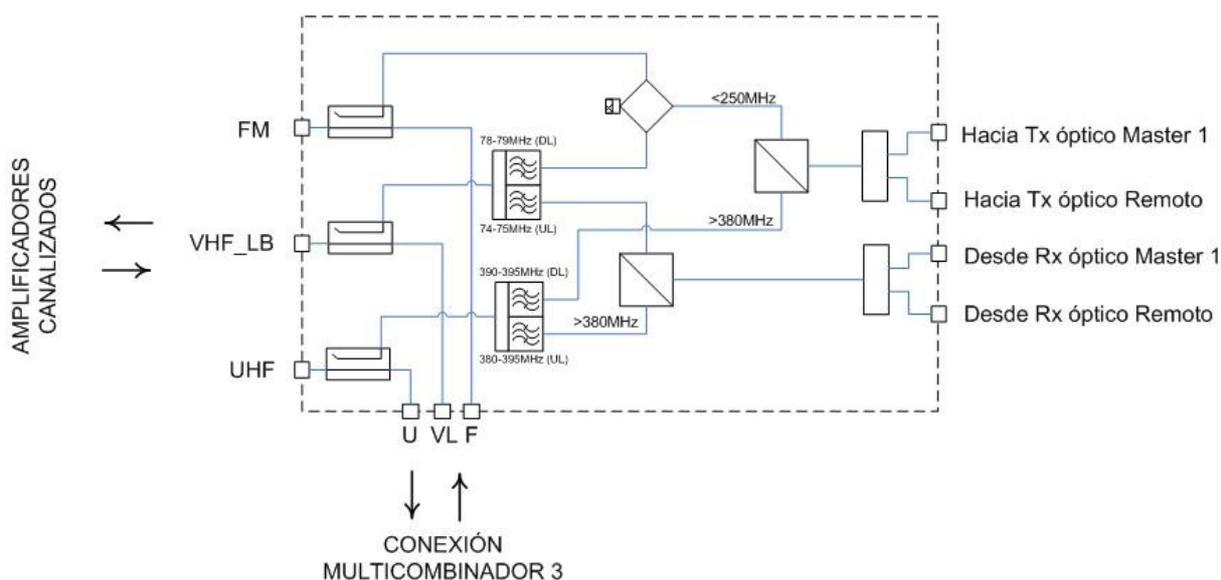


Imagen 30. Multicombinador 1. Maestro principal lado España

En este multicombinador podemos diferenciar 2 partes, la primera de ellas es la que enlaza los equipos amplificadores canalizados con los equipos ópticos, y la segunda unirá los amplificadores con el multicombinador 3 que a su vez enlazará con el cable radiante.

Se han realizado los cálculos para cada una de las frecuencias, así como para los diferentes caminos de uplink y downlink, resumiéndolos en las siguientes tablas de atenuaciones:

Atenuaciones multicombinador 1 sentido downlink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	FM	UHF
Pérdidas conexión multicombinador 3 (dB)	1,0	1,0	1,0
Pérdidas hacia equipos ópticos (dB)	39,5	36,0	35,1

Tabla 19. Atenuaciones totales multicombinador 1 Francia. DL

Atenuaciones multicombinador 1 sentido uplink

Frecuencia (MHz)	VHF_LB	UHF
Pérdidas conexión multicombinador 3 (dB)	36,0	35,1
Pérdidas hacia equipos canalizados (dB)	7,0	6,1

Tabla 20. Atenuaciones totales multicombinador 1 Francia. UL

3.3.2.3 Sistema óptico

El rack maestro principal se completará con el sistema óptico, necesario para enlazar tanto con los amplificadores remotos instalados en el interior del túnel, como con los amplificadores a instalar en la parte española.

Podemos distinguir entre dos sistemas ópticos:

- Sistema óptico 1. Compuesto por dos transmisores ópticos modelo 20-004001 y dos receptores ópticos 20-004101, combinándose mediante un multiplexor/demultiplexor óptico WDM modelo BWMR 1310/1550. Este sistema enviará y recibirá las señales captadas en la boca Francia hacia los repetidores de banda selectiva instalados en la boca España. También enlazará directamente con los equipos instalados en el interior del túnel.
- Sistema óptico 2. Al igual que en el caso anterior, ambas señales serán combinadas en una sola fibra óptica aunque en este caso solamente necesitaremos un transmisor un receptor óptico. Este sistema recibirá y transmitirá directamente las señales captadas en la parte española.

Se utilizará el mismo símbolo descrito en la boca España.

3.3.3 Maestro secundario

Igual que en el caso anterior, todos los equipos activos y pasivos serán instalados en armarios de 19" y serán ubicados en el lado Francia, a ser posible junto al rack principal. Sus principales funciones serán:

1. Recepción/transmisión vía fibra óptica de las portadoras pertenecientes a las bandas de frecuencia captadas en la boca España.
2. Amplificación de las portadoras recibidas de la boca España mediante equipos de banda selectiva.
3. Combinación de todas las portadoras captadas en la boca Francia y la boca España, antes de ser enviadas al sistema de enlace secundario.

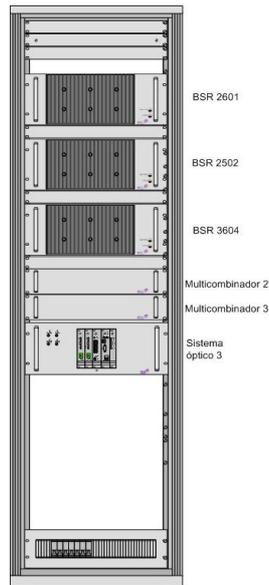


Imagen 32. Rack maestro secundario. Lado Francia

3.3.3.1 Equipos activos

En este punto no será necesaria la instalación de equipos canalizados, ya que todas las portadoras que llegan a estos amplificadores ya han sido previamente definidas. Por lo tanto todos los equipos activos utilizados serán banda selectiva.

- Modelo BSR 2601 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva unidireccional para la banda de FM (87,5-108MHz).
- Modelo BSR 2502 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva bidireccional para la banda de VHF (148-174MHz).
- Modelo BSR 3604 de la marca AXELL Wireless. Amplificador banda selectiva unidireccional para la banda de ACROPOL (380-395MHz).

Estos equipos amplificarán todas las bandas de frecuencias captadas en la boca España que han sido recibidas mediante el enlace óptico.

A su vez, se recibirán todas las frecuencias correspondientes a las comunicaciones UL de los terminales de usuario utilizados en el interior del túnel y se enviarán hacia los amplificadores canalizados de la parte española por la misma fibra óptica.

3.3.3.2 Equipos pasivos. Multicombinador

La parte de combinación del rack maestro secundario puede dividirse en dos partes: una será la encargada de combinar/distribuir las señales captadas en la boca España y la otra combinará/distribuirá todas las portadoras del sistema. Estos multicombinadores estarán compuestos por los equipos pasivos descritos anteriormente que tendrán las siguientes características.

Multicombinador 2

Este multicombinador será el encargado de recibir y transmitir todas las bandas de frecuencia captadas en el master principal del lado español vía fibra óptica, y de enlazar con los amplificadores banda selectiva instalados en el rack maestro secundario.

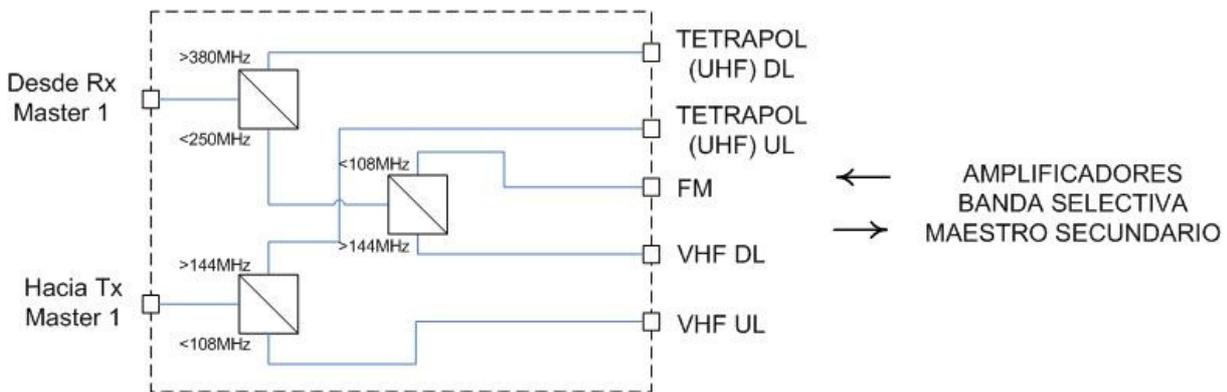


Imagen 33. Multicombinador 2. Maestro secundario lado Francia

Se han realizado los cálculos de atenuaciones de cada uno de los pasivos que componen el multicombinador, dando lugar a la siguiente tabla resumen.

Atenuaciones multicombinador 2 sentido downlink

Frecuencia (MHz)	FM	VHF	UHF
Pérdidas combinación hacia amp banda selectiva (dB)	1,0	1,0	0,5

Tabla 21. Atenuaciones totales multicombinador 2 Francia. DL

Atenuaciones multicombinador 2 sentido uplink

Frecuencia (MHz)	VHF	UHF
Pérdidas hacia equipos ópticos (dB)	0,5	0,5

Tabla 22. Atenuaciones totales multicombinador 2 Francia. UL

Multicombinador 3

En el sentido DL, la función principal del multicombinador 3 será la de combinar la totalidad de portadoras recibidas tanto en el lado español, como las del lado francés. Para luego ser enviadas al sistema de enlace secundario y este a su vez al cable radiante.

En el sentido UL, recibirá todas las comunicaciones cursadas desde el interior del túnel combinadas en el cable coaxial, por lo que será necesario proceder a su separación espectral para que sean enviadas hacia los equipos canalizados de la boca España o de la boca Francia, dependiendo de la banda de frecuencia.

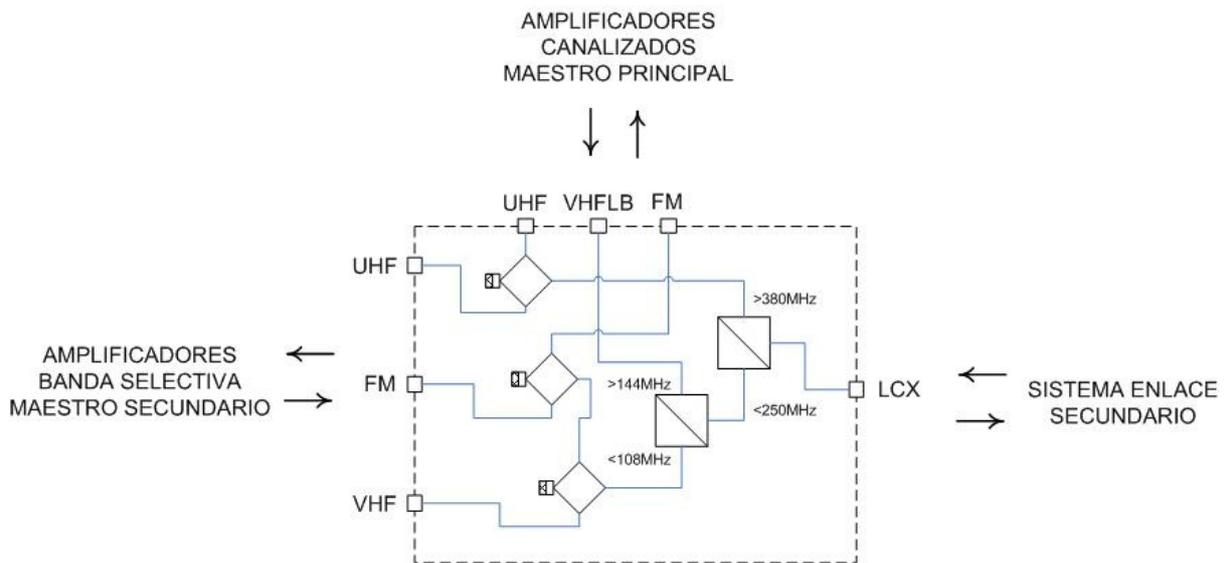


Imagen 34. Multicombinador 3. Maestro secundario lado Francia

Las siguientes tablas muestran las atenuaciones calculadas para cada una de las bandas de frecuencia que son combinadas y distribuidas en este multicombinador.

Atenuaciones multicombinador 3 sentido downlink

Frecuencia (MHz)	VHF LB	FM	VHF	UHF
Pérdidas combinación hacia enlace secundario (dB)	4,5	8,0	1,0	4,0

Tabla 23. Atenuaciones totales multicombinador 3 España. DL

Atenuaciones multicombinador 3 sentido uplink

Frecuencia (MHz)	VHF LB	VHF	UHF
Pérdidas hacia multicombinador 1 (dB)	4,5	1,0	4,0

Tabla 24. Atenuaciones totales multicombinador 3 España. UL

3.3.3.3 Sistema óptico

El sistema óptico del maestro secundario, tiene la función de recibir todas las portadoras procedentes de la parte española y realizar la conversión óptico-eléctrica. Todo el espectro recibido pasará a los amplificadores de banda selectiva del rack secundario. A su vez, en el sentido contrario recibirá las portadoras amplificadas en UL para ser enviadas vía fibra óptica al maestro principal de Francia.

En este caso, el sistema óptico estará compuesto por un por un transmisor, un receptor óptico y un mutiplexor WDM.

3.3.4 Sistema de enlace secundario.

El sistema de enlace secundario, lo compone un cable coaxial que enlazará con un acoplador direccional instalado en la boca del túnel y este a su vez alimentará a dos secciones del cable radiante. La función principal será transportar todas las frecuencias del sistema de radiocomunicaciones y de radio comercial hasta el sistema radiante y viceversa.

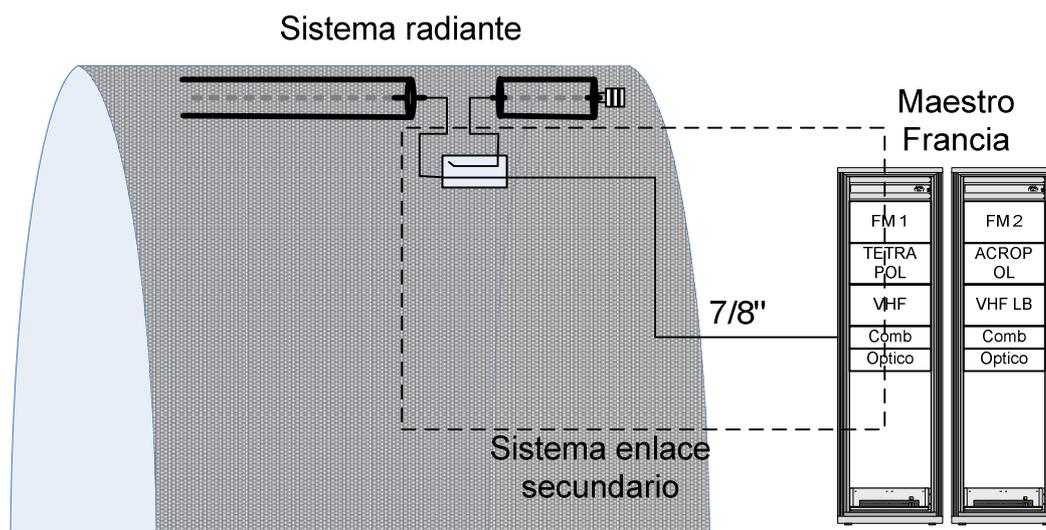


Imagen 35. Esquema sistema enlace secundario. Francia

La función y las características del sistema de enlace secundario, ya han sido descritas en profundidad en la parte española. Para este caso vamos a suponer una distancia de 100 metros entre el multicombinador 3 y el acoplador direccional instalado en la boca del túnel. Donde se instalará un cable coaxial de RFS modelo LCF78-50JA.

3.3.5 Niveles de señal boca Francia

Realizando un resumen de las ganancias y atenuaciones de todos los equipos que componen el rack maestro y secundario de la parte Francesa, realizamos una tabla resumen con los niveles de potencia esperados en cada parte. Hay que tener en cuenta que los niveles de potencia captados en las antenas son totalmente orientativos.

Descripción	VHF_LB	FM 1	FM 2	VHF	UHF 1	UHF 2
Nivel de señal en antena (dBm)	-75		-68			-70
Ganancia antena (dB)	8		0,5			9,2
Atenuación cable 1/2" (dB/100m)	2,02		2,24			5,59
Entrada amplificador canalizado (dBm)	-69,02		-69,7			-66,39
Ganancia amplificador canalizado (dB)	95		95			90
Nivel salida amplificador canalizado (dBm)	25,98		25,3			23,61
Pérdidas combinador 1. Sistema óptico (dB)	39,5		37,5			35,1
Pérdidas combinador 1. Radiante (dB)	1		1			1
Pérdidas combinador 2 (dB)		1		1	0,5	
Pérdidas combinador 3 (dB)	4,5	8	8	1	4	4
Pérdidas enlace óptico-cable + equipos (dB)	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5
Nivel entrada multicombinador 2 (dBm)		-11,24		-8,87	-17,49	
Entrada amplificador banda selectiva (dBm)		-33,74		-31,37	-39,49	
Ganancia amplificador banda selectiva (dB)		60		60	60	

Potencia salida enlace secundario(dBm)	20,48	18,26	16,3	27,63	16,51	18,61
Hacia TX óptico (dBm)	-13,52		-12,2			-11,49

Tabla 25. Cálculos niveles Master Francia

La siguiente tabla, muestra los niveles de potencia que se inyectarán a las dos secciones del cable radiante. Una cubrirá el tramo hasta el remoto y la otra cubrirá la boca del túnel.

Descripción	VHF_LB	FM 1	FM 2	VHF	UHF 1	UHF 2
Nivel de salida multicombinador 3 (dBm)	20,48	18,26	16,3	27,63	16,51	18,61
Atenuación cable 7/8" (dB/100m)	1,07	1,19	1,19	1,53	2,38	2,38
Entrada Acoplador direccional	19,41	17,07	15,1	26,1	14,13	16,23
Pérdidas directas acoplador direccional	30	30	30	30	30	30
Pérdidas de acoplo acoplador direccional	1	1	1	1	1	1

Potencia de partida cable radiante (dBm)	18,41	16,07	14,1	25,1	13,13	15,23
Potencia de partida cable radiante_boca (dBm)	-10,59	-12,93	-14,9	-3,9	-15,87	-13,77

Tabla 26. Niveles de señal enlace secundario boca Francia

3.3.6 Esquema general boca Francia

El siguiente diagrama de bloques muestra el conexionado entre los diferentes equipos utilizados tanto en el sistema principal como en el secundario, de esta forma conseguimos una visión en conjunto de todo el sistema, permitiéndonos una mejor comprensión.

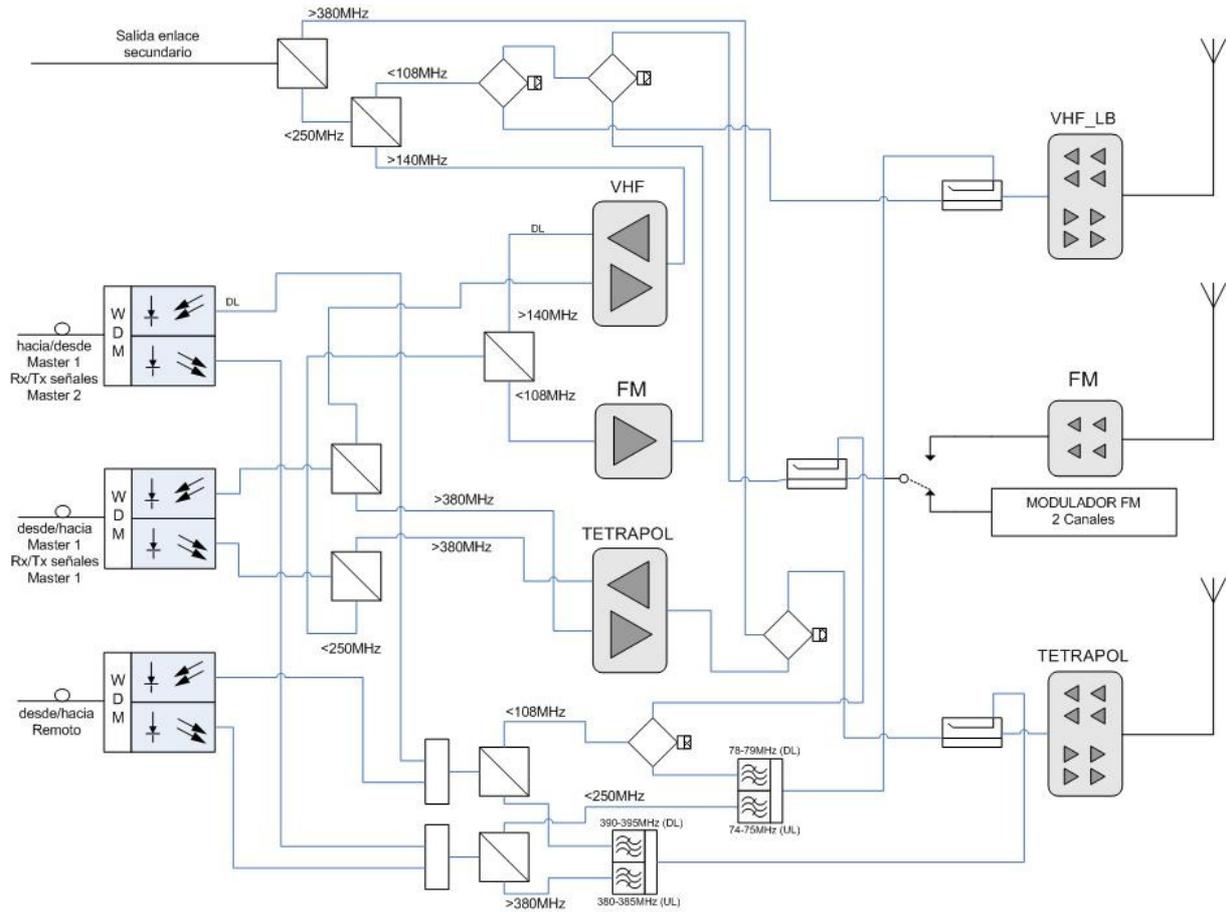


Imagen 36. Esquema general boca Francia

3.4 Sistema de enlace óptico

Llamaremos sistema de enlace óptico al tramo de fibra óptica que enlazará los maestros de la boca España y de la boca Francia, con los amplificadores remotos instalados en el túnel, así como con los sistemas maestros de la boca opuesta.

Se realizará una instalación de una manguera de fibra óptica monomodo de 8 fibras entre cada uno de los equipos ópticos instalados en la boca Francia, España y en el interior de túnel. Utilizaremos mangueras independientes para asegurarnos en caso de corte de alguna de ellas, que el sistema va a seguir funcionando correctamente. Será importante que las mangueras estén construidas con materiales ignífugos que retarden la propagación de la llama.

Las mangueras ópticas deberán fusionarse y conectorizarse en bandejas ópticas, donde se instalaran enfrentadores SC/APC. Desde estos enfrentadores ópticos hasta el sistema óptico de cada uno de los armarios, se llevará un latiguillo óptico SC/APC-SC/APC. Hay que recordar que los sistemas ópticos del maestro principal y secundario llevarán integrado un multiplexor/demultiplexor óptico WDM, por lo que será necesaria una única fibra por cada uno de los sistemas ópticos.

Hemos tenido en cuenta unas pérdidas de 1dB debido a la atenuación de 1.500m de fibra óptica, más 1dB por fusiones y conexiones ópticas. A esto hay que sumarle 19,5dB por pérdidas de conversión eléctrico-óptica y viceversa. En total contaremos con 21,5dB de pérdidas debido al enlace óptico.

3.5 Sistema redundante. Criterio y funcionalidad

Como comentábamos en la introducción, la redundancia en este tipo de sistemas es de vital importancia, ya que en el caso de incendio puede verse afectada la tirada de cable radiante, el cable óptico o algunos de los equipos amplificadores instalados en el interior del túnel. Proponemos un sistema redundante en cobertura para prevenir esta posible situación. En la siguiente imagen, observamos un esquema simplificado del túnel con cada uno de los sistemas y como están enlazados entre sí.

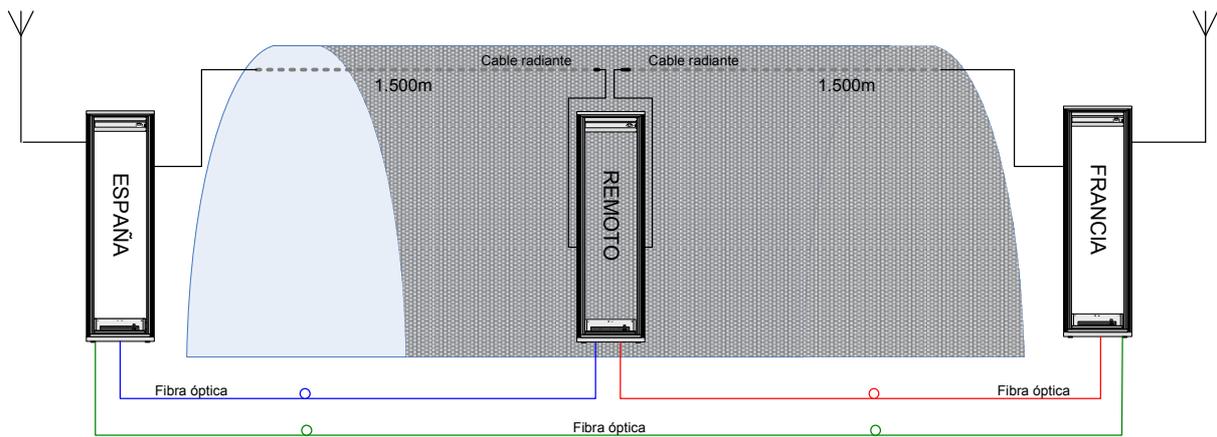


Imagen 37. Esquema sistema redundante

Con esta topología de cable radiante en el túnel, cada tramo está alimentado por cada uno de los extremos por unidades amplificadores diferentes, y a su vez, cada unidad amplificadora debe tener capacidad suficiente para alimentar de forma independiente a todo el tramo de cable que parte de ella.

De esta forma se garantizarán las comunicaciones en el interior del túnel ante dos tipos de incidencia:

- 1 Por causas de un accidente, el cable radiante quede seccionado. En este caso los dos tramos que quedará dividida cada sección, serán cubiertos desde cada uno de los equipos amplificadores instalados en cada punta del cable. Manteniendo la cobertura en el 100% del trazado.
- 2 Debido a cualquier causa, avería ó fallo de corriente eléctrica, uno de los amplificadores secundarios o remoto quedará inactivo. En este caso sería el amplificador opuesto el que daría servicio a la totalidad del túnel.

Solamente se interrumpirían completamente las comunicaciones en algún tramo del túnel, en caso que el cable radiante se rompiera por varios lugares ó que el amplificador remoto y uno de los secundarios fallara.

En el siguiente punto realizaremos los cálculos necesarios para asegurar la cobertura en el 100% del túnel incluso previendo averías en algún equipo o cortes del cable.

4 CABLE RADIANTE. NIVELES DE SEÑAL

Podemos definir el cable radiante, como un cable coaxial con unas ranuras en su conductor exterior, que permiten transmitir y recibir señales en toda su longitud.

Para este tipo de instalaciones, el uso de cable radiante tiene muchas más ventajas que la utilización de antenas. Es necesario prever que si se utilizan antenas, es posible que debido a obstáculos en el interior del túnel, por ejemplo por un accidente de vehículos de gran tamaño, queden zonas muy atenuadas, por lo que la calidad del servicio disminuirá. También se puede dar el caso, de que el trazado del túnel no sea completamente lineal, generando una atenuación en la potencia debido a la propagación de la señal al rebotar en las paredes de túnel.

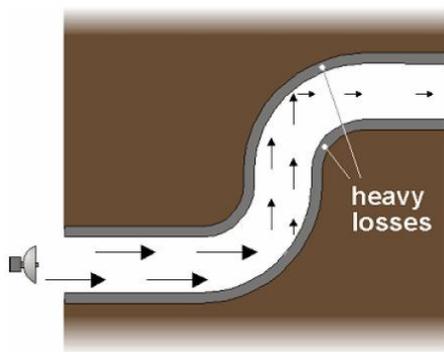


Imagen 38. Atenuación por curvas [8]

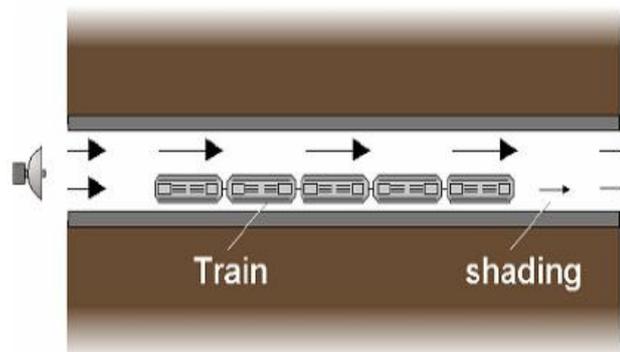


Imagen 39. Zona de sombra por obstáculo [8]

Por estos motivos, la utilización del cable radiante tiene muchas más ventajas, ya que podemos asegurar una cobertura lineal en toda la longitud del túnel, independientemente de las curvas o de los obstáculos interiores. Esto nos permitirá realizar cálculos de cobertura más fiables, porque en todo momento podremos prever cual será la potencia transmitida en cualquier punto del túnel

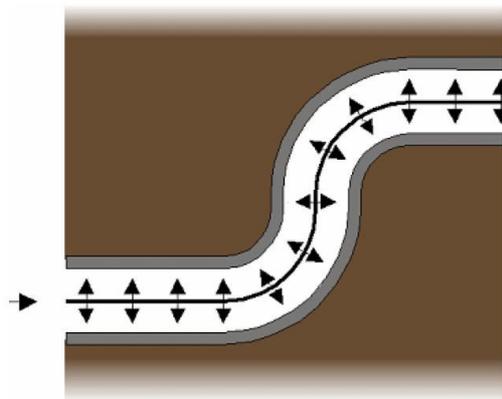


Imagen 40. Cobertura lineal con radiante [8]

El cable radiante será grapado a lo largo de todo el túnel, dejando una distancia entre grapas de 1,3m como máximo. Estas grapas abrazarán al cable y serán plásticas al 90% de la instalación y el otro 10% serán grapas metálicas por seguridad

Para realizar los cálculos de cobertura, tenemos que diferenciar entre la señal transmitida por el interior del cable y la señal que se radia al exterior a través de las ranuras.

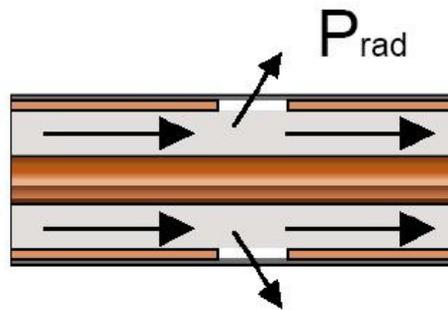


Imagen 41. Cable radiante. Potencia radiada [8]

Por lo tanto, para calcular el nivel de potencia radiada en el cable utilizaremos la siguiente fórmula:

$$P_{rad} = P_{in} - (\alpha_{cable} + \alpha_{acoplo})$$

Donde restaremos a la potencia de entrada al cable radiante, las pérdidas debidas a la longitud del cable, más la atenuación producida por el acoplamiento al transmitirse la señal.

Para calcular la señal que recibiría un terminal de usuario en el interior del túnel, el fabricante de cable aconseja añadir unas pérdidas teóricas de acoplamiento de 6dB, debido a que la recepción será realizada a una distancia superior de 2m del cable. También se reservará un fading marginal del enlace de 10dB para mayor seguridad.

Por lo tanto, el nivel de potencia teórico en recepción en cualquier punto del túnel, vendrá dado por la siguiente fórmula.

$$P = P_{in} - (\alpha_{cable} + \alpha_{acoplo}) - 6dB - 10dB$$

Ahora es necesario seleccionar el cable radiante adecuado, para cubrir la distancia total del túnel con los niveles mínimos requeridos.

4.1 Validación del cable radiante 7/8" y 1-1/4"

La elección del tipo de cable dependerá de dos parámetros:

1. La longitud total de cada uno de los tramos a cubrir. En este caso contaremos 1.500 metros desde cada una de las bocas hasta el remoto instalado en el interior.

La longitud del cable afectará a la atenuación de la señal, ya que a mayor distancia las pérdidas serán mayores.

2. El segundo parámetro que hay que tener en cuenta, es la frecuencia más alta que se va a utilizar, 400MHz para este caso. Para este valor, se fijarán unos niveles mínimos de señal que deben ser garantizados en todo el túnel

Estos niveles mínimos de potencia deben ser garantizados en los siguientes modos de funcionamiento:

- Modo de funcionamiento nominal. Este será el modo normal, sin roturas en el cable radiante y con todos los equipos operativos. Para este caso definiremos un nivel mínimo de recepción en el interior del -90dBm, con un fading marginal de 10dB.
- Modo de funcionamiento degradado. Este modo se calculará con el cable radiante roto por un único lugar, con el equipo amplificador remoto apagado o averiado ó con uno de los sistemas secundarios de alguno de los master apagado o averiado. El mínimo nivel recibido será igual que en el caso anterior de -90dBm, con un fading marginal de 10dB.

Teniendo en cuenta las características técnicas de cada cable, que pueden ser consultadas en los anexos adjuntos, configuramos la siguiente tabla resumen:

Modelo cable radiante	RLK114-50JFNA	RLK78-50JFNA
Frecuencia mayor	400MHz	400MHz
Pérdidas de acoplamiento	56dB	57dB
Pérdidas por distancia	1,90dB/Km	2,70dB/Km

Tabla 27. Resumen características técnicas del cable radiante

A continuación procedemos a certificar que cable será el óptimo para este proyecto.

4.1.1 Cálculos teóricos de potencia en el interior del túnel

Este túnel tiene una longitud total de 3.000metros, y para su cobertura se requieren 2 maestros instalados en cada una de las bocas del túnel, al que se le añadirá un esclavo instalado en la mitad del túnel, enlazado a estos últimos mediante fibra óptica.

Dispondremos de 2 tramos de cable radiante de 1.500m que enlazará el maestro de la boca España y el de la boca Francia con el sistema remoto. Basándonos en estos datos, podemos realizar un cálculo de los niveles de señal en modo nominal y en modo degradado.

Modo Nominal

En el modo de funcionamiento nominal, sin ningún corte en el cable radiante, deberemos de cubrir al menos la mitad de cada uno de los tramos, es decir 750m. Teniendo en cuenta que se inyectará señal al cable radiante desde ambas parte a la vez.

Según los cálculos que se pueden consultar en los anexos, realizamos una tabla resumen con los niveles de cobertura para el modo nominal para ambos cables que estamos comparando.

Modelo cable radiante	RLK114-50JFNA	RLK78-50JFNA
Frecuencia mayor	400MHz	400MHz
Nivel de partida peor caso	+12,23dBm	+12,23dBm
Pérdidas de acoplamiento	56dB	57dB
Pérdidas por distancia (750m)	14,25dB	20,25dB
Pérdida >2m	6dB	6dB
Fading marginal	10dB	10dB
Nivel recibido en usuario	-74,02dBm	-81,02dBm

Tabla 28. Resumen niveles de cobertura radiantes (modo nominal)

Para estos valores, el nivel recibido en un terminal situado a 750m de la boca del túnel recibirá un nivel de potencia de -74,02dBm si utilizamos el cable de 1-1/4" y del -81,02dBm si el que se usa es el cable de 7/8", por lo tanto en modo nominal ambos cables podrían ser validados.

Modo Degradado

En modo degradado se considerará que existe un corte en el cable radiante, que el sistema remoto ó alguno de los sistemas secundarios están averiados o apagados. Por lo tanto se calculará la viabilidad del sistema para un equipo radio situado a 1.500m del punto de inyección de la señal para el peor caso

Modelo cable radiante	RLK114-50JFNA	RLK78-50JFNA
Frecuencia mayor	400MHz	400MHz
Nivel de partida peor caso	+12,23dBm	+12,23dBm
Pérdidas de acoplamiento	56dB	57dB
Pérdidas por distancia (1.500m)	28,5dB	40,5
Pérdida >2m	6dB	6dB
Fading marginal	10dB	10dB
Nivel recibido en usuario	-88,27dBm	-101,27dBm

Tabla 29. Resumen niveles de cobertura radiantes (modo degradado)

Para los valores calculados, el nivel de potencia recibida por el usuario utilizando el cable de 1-1/4" será de -88,27dBm y de -101,27dBm con el cable de 7/8", por lo tanto tenemos de descartar este último ya que no cumplirá los niveles de potencia mínimos requeridos de -96dBm.

Según los cálculos realizados para el modo nominal y degradado, se validará de 1-1/4". Utilizando este cable y con los equipos descritos anteriormente, podemos asegurar que el sistema de radiocomunicaciones del túnel va a funcionar correctamente, permitiendo una correcta utilización de todas las bandas de frecuencias utilizadas por los servicios de emergencia.

4.1.2 Cálculos teóricos de potencia uplink

Hay que tener en cuenta que cuando hablamos de señales en uplink, nos estamos refiriendo al camino que siguen estas señales desde que salen del terminal portátil de usuario, hasta que son transmitidas por las antenas instaladas en cada una de las bocas del túnel. Por lo tanto será necesario realizar un estudio de las atenuaciones también en este sentido, ya que será de vital importancia poder mantener una comunicación bidireccional entre los servicios de emergencia que trabajen en el interior del túnel, con sus sistemas centrales correspondientes.

Un terminal de usuario estándar como el modelo MTP 850S de Motorola, transmite con una potencia de 1,8W, es decir, alrededor de +33dBm. Para esta potencia de salida, vamos a realizar un cálculo de validación del enlace en modo de funcionamiento degradado, para asegurarnos que el sistema funcionará correctamente en ambos sentidos, incluso en el peor caso.

En la siguiente tabla podemos observar los cálculos realizados para el enlace de uplink en el peor de los casos, considerando que el terminal de usuario transmite con una potencia de +33dBm.

Descripción	UHF
Nivel de señal transmitida (dBm)	33
Pérdidas señal >2m (dB)	6
Atenuación acoplo cable 1-1/4" (dB)	56
Atenuación lineal 1.500m cable 1-1/4" (dB)	28,5
Atenuación acoplador direccional enlace secundario (dB)	30
Atenuación cable coaxial 7/8" enlace secundario 100m (dB)	2,38
Pérdidas multicombinador 3 (dB)	4
Pérdidas multicombinador 1 (dB)	6,1
Ganancia amplificador UHF canalizado (dB)	90
Pérdidas cable coaxial 1/2" enlace principal 100m (dB)	5,59
Ganancia antena UHF	9,2

Potencia salida antena UHF (dBm)	-6,37
----------------------------------	--------------

Tabla 30. Cálculos enlace uplink

Si suponemos que la estación base de UHF ha transmitido con una potencia de +33dBm y a nuestro emplazamiento han llegado -70dBm, significa que hay unas pérdidas de enlace de 103dB, por lo tanto si transmitimos -6,37dBm, a la estación base llegarán alrededor de -110dBm. Considerando una estación base típica, como el modelo DIB-500 de Hytera con una sensibilidad de -119dBm, podemos certificar que la comunicación se llevará a cabo satisfactoriamente en ambos sentidos para el peor caso.

5 CONCLUSIONES

Los túneles son infraestructuras muy importantes dentro de la red de transporte de cualquier país, ya que favorecen el transporte de carreteras y el desarrollo de las economías regionales. Hay que tener en cuenta, que hay muchos túneles que se construyeron hace años para unos requerimientos de uso que han quedado anticuados. Las condiciones de tráfico y los usuarios de los mismos han cambiado notablemente, produciéndose un incremento de tráfico y aumentando por lo tanto el riesgo de producirse accidentes.

Por los motivos anteriormente comentados, los servicios de comunicaciones en el interior de los túneles son de vital importancia, y de obligada implementación desde el 2006. Estos servicios facilitarán las comunicaciones entre todos los servicios de emergencia en caso de producirse un accidente, evitando en gran medida males mayores.

Para este proyecto se ha seleccionado un túnel situado en la frontera entre España y Francia. Este caso concreto es de especial interés, ya que es necesaria la integración de todas las frecuencias de emergencias que se utilizan en cada uno de los países, permitiendo una coordinación eficaz entre las diferentes fuerzas de seguridad de cada país. A esto se le ha añadido un sistema redundante, que permitirá que la cobertura en toda la longitud del túnel siga manteniendo los niveles mínimos requeridos, incluso en caso de avería en alguno de los equipos activos o por cortes en los cables.

Personalmente, la realización de este proyecto ha supuesto un reto, ya que la vuelta a la universidad después de 10 años y compaginarlo con el trabajo diario no ha sido una tarea fácil. En cualquier caso, espero poder utilizar los nuevos conocimientos que he adquirido durante la realización de este proyecto en mi vida laboral, debido a que es un tema con muchas posibilidades para poder seguir desarrollándolo en un futuro.

6 ANEXOS

Se han incluido los anexos en el CD adjunto a este proyecto, donde se detallan las especificaciones técnicas de los equipos, cálculos realizados, planos y esquemas comentados esta memoria, así como los presupuestos de todos los equipos que componen este sistema.

7 BIBLIOGRAFIA

[1] JOSÉ M^a HERNANDO RÁBANOS. *Comunicaciones Móviles*. Madrid: Editorial centro de estudios Ramón Areces, S.A.

[2] F. SAYADI, M.Ismail, N.MISRAN y K.JUMARI, 2009. Radio Coverage inside Tunnel Utilizing Leaky Coaxial Cable Base Station. *Journal of Applied Sciences*, 9: 2887-2896. <<http://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2009.2887.2896>> (Septiembre 2012)

- [3] DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA. *Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del consejo de 29 de abril de 2004 sobre requerimientos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.* < <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:167:0039:0091:ES:PDF>>. (Febrero 2013)
- [4] BOE. *Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carretera del estado.* < <http://www.boe.es/boe/dias/2006/05/27/pdfs/A19970-19985.pdf>>. (Julio 2012)
- [5] BOE. *Orden ITC/332/2010, de 12 de febrero, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias (CNAF).* < <http://www.boe.es/boe/dias/2010/02/19/pdfs/BOE-A-2010-2719.pdf>>. (19 de Febrero 2013)
- [6] AXELL WIRELES. Página de Axell Wireless. < <http://www.axellwireless.com> >. (04 de Abril 2013)
- [7] MICROSOFT. *Guía de Visio para principiantes.*< <http://office.microsoft.com/es-mx/visio-help/guia-de-visio-2010-para-principiantes-HA010357067.aspx> > (Diciembre 2012)
- [8] RFS. Pagina de RFS. <http://www.rfsworld.com/home_1,1.html> (Junio 2013)

8 GLOSARIO

ACROPOL. Automatisation des Communications Radiotéléphoniques Opérationnelles de POLice

ADC. Analogue to Digital Converter

ALC. Automatic Limit Control

CNAF. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias

DAC. Digital to Analogue Converter

DL: Downlink

DSR. Software Defined Radio

FM. Frequency Modulation

IMD: Intensidad Media Diaria de vehículos

RF. Radiofrecuencia.

SAW. Surface Acoustic Wave

TETRA. Terrestrial Trunked Radio

UHF. Ultra High Frequency

UL: Uplink

VHF. Very High Frequency

WDM: Wavelength Division Multiplexing