

Las telecomunicaciones en la línea de Alta Velocidad Madrid-Albacete-Valencia

Telecommunications on the Madrid-Albacete-Valencia High Speed Line

Revista de Obras Públicas
nº 3.522. Año 158
Junio 2011
ISSN: 0034-8619
ISSN electrónico: 1695-4408

Ricardo Ferreira Gómez. Ingeniero de Telecomunicaciones
Jefe de Telecomunicaciones Ferroviarias. Adif. Madrid (España). rop@ciccp.es
José Alberto González Parrilla. Ingeniero de Telecomunicaciones
Jefe de GSM-R Red Móvil. Adif. Madrid (España). rop@ciccp.es

Resumen: Los sistemas de Telecomunicaciones desde los orígenes del ferrocarril, han sido un soporte tecnológico para la explotación ferroviaria. Los movimientos de los trenes, el control del tráfico, los telemandos de cualquier tipo de señales, así como cualquier necesidad telemática tanto para la gestión tanto como para la explotación ferroviaria, se han venido apoyando en las técnicas de la electrónica aplicadas a las Telecomunicaciones. Hoy día es impensable el desarrollo del ferrocarril sin el uso de las tecnologías de los sistemas de Telecomunicaciones en todas sus facetas. El presente documento recoge, para la línea de Alta Velocidad española Madrid-Levante, una muestra, reflejada en dos apartados, de las técnicas de Telecomunicaciones utilizadas en la misma. En un caso, la red de datos de explotación de la línea, basada en el estándar MPLS. Por otra parte se presenta el sistema radio móvil GSM-R como soporte de comunicaciones de voz y de datos para el sistema de señalización europeo ERTMS, entre otros.

Palabras Clave: GSM-R; MPLS; IP; QoS; ERTMS

Abstract: Ever since the early days of railway, telecommunication systems have always formed the technological support for railway operations. Train movements, traffic control, remote signalling control and all telematic requirements for both railway management and operation, have all relied on the electronic techniques applied to telecommunications. The development of railways today would be unthinkable without the use of telecommunication system technologies in all their aspects. This article describes the telecommunication techniques employed on the Madrid-Levante High Speed Line, with reference to the rail operations data network for the Line, based on Multiprotocol Label Switching (MPLS) and presenting the GSM-R mobile radio system as the standard for voice and data communications for the ERTMS European signalling system, among others.

Keywords: GSM-R; MPLS; IP; QoS; ERTMS

1. La Red de Datos de Explotación en la línea de Alta Velocidad Madrid - Levante

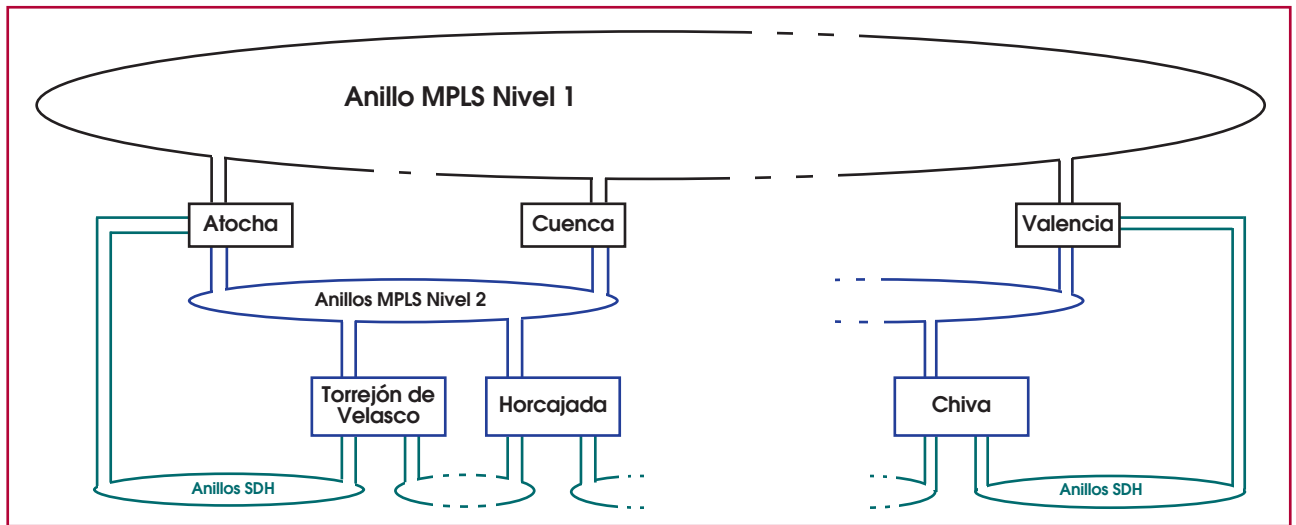
Cuando en el equipo de Telecomunicaciones Fijas de ADIF para Líneas de Alta Velocidad nos planteamos la implantación de una determinada tecnología, lo hacemos con el objetivo de proporcionar los servicios de comunicaciones necesarios que permitan dar soporte a la correcta operación, gestión, mantenimiento y administración de la línea. Para ello debemos tener en cuenta que dichos servicios serán demandados en la práctica totalidad de los emplazamientos existentes en la línea, ya sean estaciones, edificios técnicos, casetas técnicas, subestaciones eléctricas, etcétera y que estos se encontrarán dispersos a lo largo de todo el trayecto de la línea. En el caso de la Línea Madrid-Albacete-Valencia se dispone de un total de 260 emplazamientos

dispersos en aproximadamente unos 435 kilómetros de vía. Pero esta Red de Datos no solo ha de cumplir holgadamente con toda la demanda de servicios presente y futura, cada servicio requiere sus condiciones propias de tratamiento; ancho de banda, calidad de servicio, diferentes modos de presentación; a niveles de acceso y/o de red, así como existen severas restricciones relacionadas con la alta disponibilidad que toman un carácter fundamental en la concepción de una Línea de Alta Velocidad y que nos obliga a plantear una red enormemente flexible a nivel funcional y segura a nivel de operación.

El diseño de la red de Telecomunicaciones habrá de tener, por tanto, en consideración los siguientes aspectos:

- Tecnología: El criterio de elección en la tecnología es el de establecer un punto de equilibrio entre las

Fig. 1.
Esquema de
interconexión de
emplazamientos.



tecnologías de última generación que ofrezcan las mejores características, pero a su vez deberán estar completamente probadas, obteniendo siempre la mayor garantía y seguridad.

- Arquitectura: la solución debe ser multiservicio (voz, datos, etc.) y "abierto" (es decir, no propietaria).
- Evolución: Debe proporcionar total compatibilidad con las tecnologías implantadas en las líneas existentes y abrirse a la posibilidad de evoluciones futuras.
- Topología: Diseño para dar Garantía de Disponibilidad (Redundancia).
- Gestión: Integrada y jerárquica (red y servicio)
- Interoperabilidad: Ofrecer la posibilidad de integración de los distintos servicios así como de su gestión entre las diferentes líneas de Alta Velocidad.

El objetivo de la Red de Datos de Explotación (RDE) proyectada en la LAV (Línea de Alta Velocidad) Madrid-Levante es el de servir de columna vertebral a las distintas redes de datos y servicios que se extienden a lo largo de la línea (Servicios de Alta Disponibilidad, Red de Voz, Red del Telemando de Energía, Red de Detectores, Servicios de Propósito General, Accesos a la Red Corporativa, etcétera), asegurando su conectividad a través de una sola tecnología homogénea, fiable y flexible.

Las principales ventajas que la RDE ofrece son las siguientes:

- Permite un uso eficiente del ancho de banda y gran granularidad de modo que se concentra el tráfico y evita reservas de ancho de banda inutilizado.

- Presenta mecanismos de Calidad de Servicio (QoS) mediante la asignación de prioridades, lo que permite que las demandas de los servicios prioritarios no se vean afectadas por posibles problemas de congestión, encapsulando los servicios en diferentes Redes Virtuales (VLANs) y asignando a cada una sus propios parámetros de gestión.

La tecnología implementada en la RDE de la LAV Madrid-Levante está basada en el estándar MPLS (Multiprotocol Label Switching).

La Red de Telecomunicaciones Fijas de la LAV Madrid - Levante también ha desarrollado una Red de Transporte SDH que, entre otras funciones, sirve de soporte a la Red Troncal de Datos.

La infraestructura de dicha Red Troncal implementada en la LAV Madrid - Levante, consta de 32 nodos MPLS conexiónados a través de enlaces de Fibra Óptica implementando una red de dos niveles en forma anillada. Dichos nodos están en puntos estratégicos, situados en emplazamientos clave, que centralizan las redes de servicio que dan soporte a las principales funcionalidades de una Red Ferroviaria de Alta Velocidad; como son las Subestaciones de Energía, donde se centraliza la funcionalidad del control de la Energía Eléctrica a lo largo de la línea y los Edificios Técnicos, donde se centralizan las diversas funcionalidades que permiten el control de la circulación ferroviaria.

MPLS es un estándar creado por el Grupo Especial de Ingeniería en Internet (IETF), organización internacional que proporciona estándares abiertos y define un mecanismo de transporte de datos que opera entre los

niveles dos (enlace) y tres (red) del modelo OSI, introduciendo una etiqueta entre la capa de enlace (donde se encuentra la información que permite establecer la comunicación entre equipos físicos) y la capa de red (donde está la información que permite establecer comunicación entre entidades lógicas). Dicha etiqueta contiene la información necesaria para transportar y manejar el paquete de información sin necesidad de acceder a la capa de red, es decir, que transporta la información de forma independiente al protocolo que emplean las entidades que se comunican a niveles superiores. MPLS es completamente transparente tanto si se realiza conmutación por circuitos (como en el caso de la telefonía) o conmutación por paquetes (en el caso de las redes IP).

MPLS es un estándar abierto que nos proporciona una tecnología de historia reciente y altas prestaciones, empleada en todo tipo de redes de datos, lo cual nos ofrece una enorme garantía. También proporciona gran flexibilidad y es perfectamente compatible con cualquier tecnología. Permite la configuración de todas las topologías de red, a múltiples niveles y es fácilmente gestionable. En definitiva, podemos concluir que MPLS cumple con todos los objetivos que nos marcamos en el diseño de la RDE.

En una red MPLS, encontramos dos tipos de elementos:

- LER (Label Edge Router): es el elemento que se encuentra en el borde de la red; este se encarga de recibir la información, empaquetarla, etiquetarla y remitirla a la red. Cuando recibe un paquete interno, se encarga de eliminar las etiquetas y devolverlo al exterior.
- LSR (Label Switching Router): elemento interno de la red, se encarga de recibir el paquete, leer la etiqueta y encaminar el paquete en función de la información obtenida.

Debido a las características que presenta la topología de la RDE en una LAV, todos los equipos MPLS actúan de ambos modos, es decir, actúan como elementos de borde (LER) para dar servicio a los equipos que han de conectarse a la red en el emplazamiento donde se halla el propio equipo y como elementos de paso (LSR) para transmitir la información troncal de la red.

La etiqueta MPLS se compone de 32 bits, divididos en cuatro campos que proporcionan la información suficiente para poder establecer el camino.

LABEL (20 bits)	QoS (3 bits)	ST (1 bit)	TL (8 bits)
--------------------	-----------------	---------------	----------------

- Label: es el campo que proporciona el valor (nombre) de la etiqueta.
- QoS: establece el parámetro que define las características de Calidad de Servicio.
- S: se emplea para apilar etiquetas MPLS (introducir redes MPLS dentro de otra red MPLS).
- TTL: es un contador que delimita el número de saltos que puede dar un paquete antes de que se destruya.

El viaje de un paquete a través de una red MPLS irá condicionado por lo que el router de borde (LER) haya etiquetado al recibirlo. Como hemos anticipado, nos interesa que la red MPLS sea completamente independiente del protocolo con el que llega el paquete, así pues, programaremos el LER de modo que etiquetará la información en función de lo que haya recibido a nivel físico, es decir, el puerto por el que recibe la información. Programamos un LER para que ponga la etiqueta X a todo lo que llegue por el puerto A y la etiqueta Y a lo que llegue por el puerto B. La simpleza de esta operación, unida a la simpleza de la propia etiqueta que han de procesar los router de paso (LSR), dota a los equipos de una alta capacidad de conmutación al obviar la lectura y procesado de las cabeceras de protocolos más complejos como es el caso de IP.

La decisión del camino que ha de llevar un paquete, se toma asignando a cada etiqueta un túnel o camino virtual, es decir, estableciendo un LSP (Label Switched Path). Cada LSP se programa indicando los nodos por donde ha de pasar un paquete con una etiqueta concreta, pero no se establece la ruta física, si el LSP establece que un paquete ha de pasar del nodo A al nodo B, el camino físico que siga el paquete, incluso los nodos intermedios por los que tenga que pasar, se autocalculan en función de la disponibilidad, las restricciones y los costes que presente cada enlace disponible entre ambos nodos.

Esta red permite adaptar los flujos de tráfico a los recursos físicos de la red equilibrando de forma óptima los enlaces, es decir, evita que algunos enlaces y equipos de la red se saturen mientras que otros se encuentran infrutilizados, previniendo de esta manera la creación de cuellos de botella y usando de forma eficiente todos los enlaces, balanceando la carga en

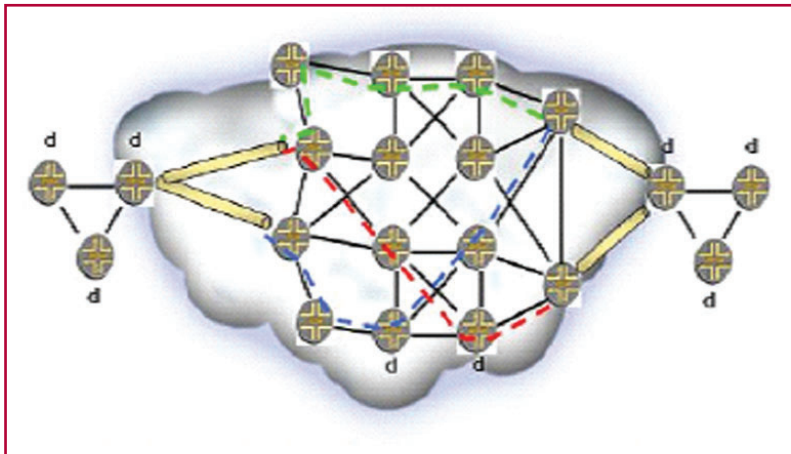


Fig. 2. Modelización de Tráfico y QoS.

enlaces paralelos, con máximo rendimiento y mínimos retardos y pérdidas.

MPLS permite recalcular dinámicamente las rutas a seguir por cierto tipo de tráfico en función de parámetros variables como el nivel de utilización de un enlace o la carga de procesamiento de alguno de los nodos. De la misma manera permite forzar un tráfico por una ruta determinada reservada a tal efecto.

La ventaja de la ingeniería de tráfico MPLS es que se puede aplicar directamente sobre una red IP, independientemente de la infraestructura que le de soporte, con un mayor nivel de detalle y de forma más sencilla y eficiente.

La arquitectura de red empleada en la RBC de la LAV Madrid – Levante, implementa una tecnología IP/MPLS, la cual diferencia dos planos completamente separados:

- *Plano de Control:* es el plano IP, a través del cual los nodos de la red se comunican entre sí. Este plano permite la realización de las distintas funciones de gestión y control de la red. A través del plano de control, todos los equipos reciben la información del estado de la red y pueden recalcular el trazado de las rutas en función de las novedades que se van produciendo como la pérdida o saturación de enlaces o equipos. Para ello utiliza un protocolo de comunicación de estado de enlace "Link-State", a través del cual se permite a los nodos obtener una visión completa y en tiempo real de la topología de la red. La comunicación entre nodos en el plano de control se realiza mediante enrutamiento IP, utilizando un protocolo de intercambio de rutas dinámico denominado IS-IS. Éste protocolo de estado de enlace, es otro estándar abierto que consta de un mapa

de red que va actualizándose, de modo que cuando se detecta un cambio en la topología, a través del algoritmo Dijkstra establece el nuevo camino más corto entre origen y destino. Las funciones más importantes que se realizan en el plano de control mediante IS-IS son:

- Interconectar los nodos de la red, para levantar los túneles MPLS (caminos virtuales o LSPs) y poder provisionar luego los servicios de la red. Para la señalización, mantenimiento y liberación de los túneles MPLS es necesario la implementación de un protocolo que distribuya las etiquetas y que hagan posible el establecimiento automático de estos túneles (LSPs). Como protocolo de señalización de etiquetas se ha utilizado RSVP-TE que se trata de un protocolo estándar encargado de realizar la reserva de recursos de red para determinados flujos de tráfico, permitiendo así imponer criterios de Calidad de Servicio (QoS) a la red. La principal ventaja de RSVP-TE es la de poder utilizar *Fast-reroute* para proteger el tráfico frente a posibles fallos. El orden de respuesta del *Fast-reroute* es del rango de milisegundos frente a los segundos que se tardaría con otros protocolos como LDP.
- Distribuir el direccionamiento de sistema (*system ip address*) de los nodos para permitir una gestión remota.

- *Plano de Transmisión de paquetes o Plano Forwarding:* se trata del plano MPLS, es a través del cual se realiza todo lo explicado referente al etiquetado y transmisión de los paquetes asociados a los distintos servicios que presta la red. La inmensa mayoría de la información que viaja a través de la red lo hace en este plano y la calidad, las prestaciones y la garantía del servicio que presta la red en este plano estarán directamente relacionadas con el buen funcionamiento del mencionado Plano de Control.

La Red de Datos de Explotación o Red Backbone IP/MPLS de la LAV Madrid – Levante, es la columna vertebral de todas las comunicaciones de la línea y como tal, debe presentar una Arquitectura que la dotte de Alta Disponibilidad, ofreciendo varios niveles de redundancia que aseguren su servicio ante cualquier posible fallo. Es por esto que se ofrecen topologías de redundancia a niveles lógicos y físicos, tanto en enlaces como en equipos.

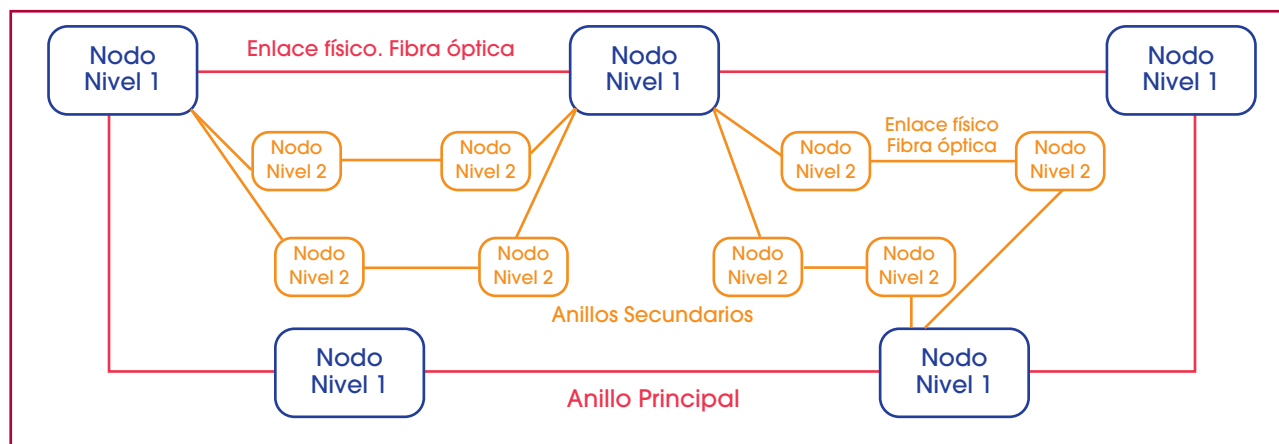


Fig. 3. Topología en anillos.

Uno de los objetivos impuestos a la red consiste en tener, para cada camino MPLS, dos posibles caminos físicos divergentes de transporte de forma que el fallo de un interfaz o enlace se pueda evitar por un camino alternativo.

Redundamos la red a nivel físico, enlazando los elementos de la red a través de Fibra Óptica en forma de anillos. De modo que establecemos un anillo troncal que abarca toda la línea, uniendo una serie de equipos que consideramos de nivel 1, situados en ciertos emplazamientos críticos y unos anillos secundarios que se forman alrededor de la red y que unen el resto de equipos de nivel 2 con los nodos más próximos de la red troncal. En función de si el equipo se encuentra situado en un emplazamiento a un lado u otro de la vía, este empleará fibra de su lado. De este modo, el lado de vía y el punto kilométrico del emplazamiento en el que se sitúa el nodo MPLS, defi-

nen en gran parte la posición del mismo en la topología física de la red.

Con el objetivo de optimizar el transporte del tráfico entre los nodos de la red, se establece una red mallada de Caminos Lógicos (LSPs) sólo entre nodos del anillo primario.

Los anillos secundarios siempre están cerrados, en sus extremos, por dos nodos del anillo principal. Cada nodo del anillo secundario, tiene configurados dos Caminos Lógicos (LSPs) que comunican con los dos nodos principales que cierran el anillo: el camino activo (*Active Pseudowire*) y el camino de reserva (*Standby Pseudowire*).

Cada nodo secundario tiene un Camino Lógico (LSP) activo y otro de reserva (en estado stand by). El Activo pasa por un nodo del anillo principal y el *standby* lo hace por el otro. En condiciones normales, el envío del tráfico usará los LSP activos, siguiendo los

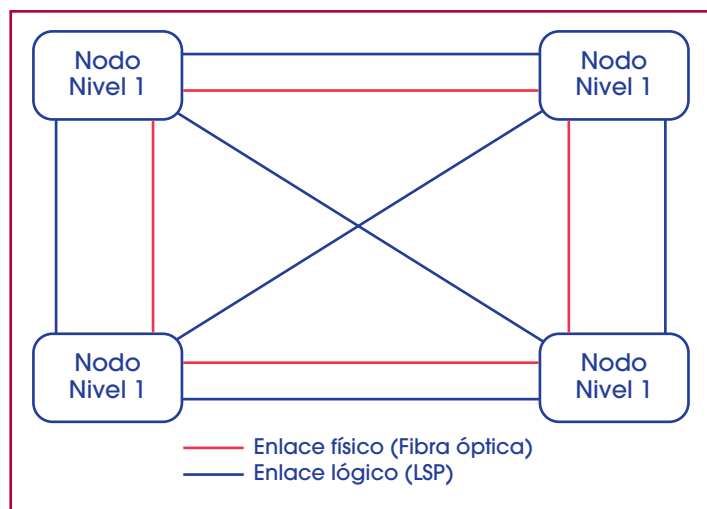


Fig. 4. Esquema de topología de LSPs anillo principal.

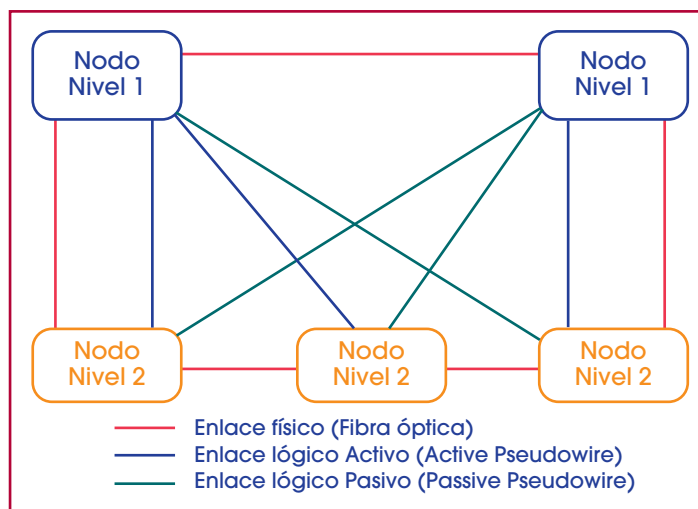


Fig. 5. Esquema de topología de LSPs anillo secundario.

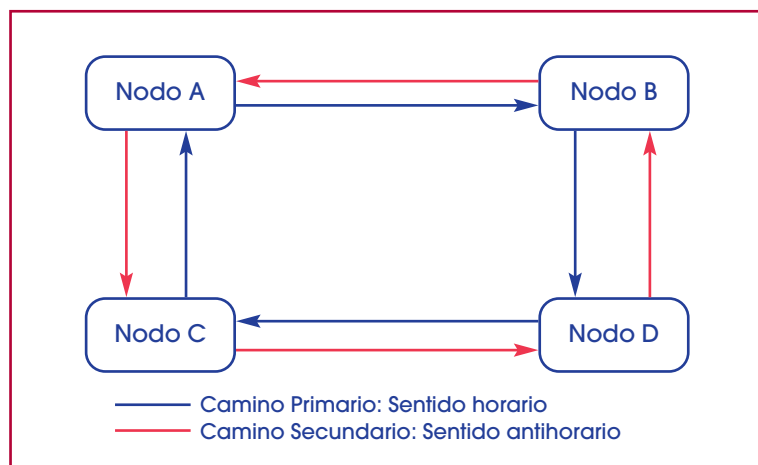


Fig. 6. Caminos primarios y secundarios para un LSP en topología de anillo.

mecanismos habituales mediante el aprendizaje de direcciones. Si hubiese algún fallo en alguno de los caminos principales, se produciría una conmutación automática del servicio al Camino de reserva.

El método utilizado para el establecimiento y enrutamiento de los LSPs MPLS a lo largo de la red es el conocido como “*Dynamic Constraint-based Routing*”, que básicamente proporciona a la inteligencia de los nodos total autonomía a la hora de elegir la ruta que un LSP MPLS seguirá, respetando siempre ciertas restricciones impuestas por el operador (grupos administrativos, ancho de banda deseado, QoS, enlaces o interfaces prohibidos/requeridos, etc.). Este método se refuerza con reoptimización periódica cada 30 minutos sin pérdida de tráfico utilizando un mecanismo *make before break*, es decir, que asegura que la nueva conexión esté operativa, antes de eliminar la antigua.

Con el enrutamiento dinámico, cualquier cambio en la red provoca que los nodos recalculan nuevas rutas para llevar los caminos que tienen configurados. Esta herramienta se vuelve más imprescindible según va aumentando la complejidad de la topología. No obstante, la arquitectura de la red en la LAV Madrid – Levante, nos proporciona una topología en forma de anillos, y estos tienen una particularidad que nos va a servir de gran ayuda a la hora de redirigir un camino lógico sin necesidad de recalculan la ruta.

Si definimos todos los caminos con un mismo sentido (horario y antihorario) y definimos los caminos de reserva en el sentido opuesto, nos aseguramos que ante cualquier cambio en la topología, el camino lógico de reserva irá a través un camino físico alternativo, evitando perder tiempos de reconfiguración de rutas.

El esquema anteriormente descrito para el establecimiento de caminos secundarios para cada LSP proporciona redundancia ante fallo de enlaces en la red. Sin embargo, para validar la funcionalidad de la red basada en MPLS en una Línea de Alta Velocidad, se requieren unos tiempos de restauración equivalentes a los conseguidos con tecnologías implantadas anteriormente, como es SDH, que al tratarse de una tecnología de conmutación de circuitos (rápida a la hora de conmutar los caminos, pero incapaz de gestionar de forma dinámica la capacidad y los recursos de la red), son del orden de 50 milisegundos.

Los mecanismos de protección anteriormente descritos no pueden proporcionar tiempos de restauración tan pequeños, por lo que se necesita un mecanismo adicional que proporcione redundancia durante el periodo que va desde la detección del fallo hasta que el extremo del LSP pueda conmutar hacia el camino de backup. La tecnología utilizada para proporcionar ese nivel de redundancia en redes MPLS es *MPLS Fast Reroute* de modo que la convergencia en caso de fallo del camino principal sea del orden de los 50 mseg.

La configuración de Calidad de Servicio (QoS) en la Red Backbone MPLS de la LAV Madrid-Levante se ha realizado de acuerdo a los criterios sobre priorización de tráfico establecidos por ADIF.

Una clase de servicio representa un conjunto de tráfico que necesita características comunes de retardo, pérdida y jitter en el tratamiento que la red le ofrece, para cuya implementación será necesario un conjunto consistente y definido de reglas de tratamiento a lo largo del camino que recorre ese tráfico dentro de la red MPLS. Este conjunto de reglas quedan definidas en las políticas PHB (Per Hop Behavior) que establecen los criterios y la prioridad aplicables a un paquete cuando pasan por un nodo (Hop) en una red con servicios diferenciados. En función de la clase de PHB con la que se haya catalogado este tipo de tráfico, el tratamiento que se le de será diferente: NC (Network Control), EF (Expedited Forwarding), AS (Assured Forwarding) DF (Default).

La red tiene por defecto cinco clases de servicio, dos para la gestión y control de los nodos de la red (Gestión y Control) y tres para los servicios de usuario (Alta prioridad, Asegurada y Best-effort). A las clases de Gestión y Control se les asigna un PHB NC, y al resto, se les asignará un PHB EF, AS y DF respectivamente.

Clases de servicio en la red MPLS		
Clases de Servicio	Ejemplos de aplicación	PHB
CONTROL	Protocolos de enrutamiento de red	NC
GESTION	SSH, SNMP, Telnet	EF
ALTA PRIORIDAD	Supervisión y gestión de equipos, Red de Alta Disponibilidad	AF
ASEGURADA	Tráfico de señalización ferroviaria	AF
BEST-EFFORT	Red de detectores	DF

La clase de servicio CONTROL se utiliza para el tráfico de control correspondiente a los protocolos de señalización y enrutamiento entre los propios nodos de la red. Estos protocolos son los responsables de mantener la topología lógica y la conmutación activas en la red, por lo que constituyen el tráfico más importante que se transporta por la red, incluso más que el propio tráfico de máxima prioridad de los clientes. Si los protocolos entre nodos se ven afectados, podría afectar a todo el tráfico de cliente que pasa a través de un nodo de red. Las aplicaciones que pueden usar la clase de servicio CONTROL son los protocolos del anteriormente definido Plano de Control que se origina en la red IP/MPLS (ejemplos claros son ISIS, RSVP).

La clase de servicio GESTION se usa para el tráfico de gestión correspondiente a la comunicación entre las plataformas de gestión y los nodos de red. Este tráfico permite al operador visualizar, controlar y gestionar el estado de la red y sus servicios, por lo que se le considera tráfico crítico y se le asigna una prioridad específica en red.

La clase de servicio ALTA PRIORIDAD se utiliza para el tráfico de supervisión, servicios de alta disponibilidad, gestión routers cliente y tráfico usuarios y es una de las tres clases de servicio de tráfico de usuario que se utilizan en la Red.

La clase de servicio ASEGURADA para el tráfico de señalización RPS es una de las tres clases de servicio de tráfico de usuario que se contemplan en la Red.

La clase de servicio BEST-EFFORT se utiliza para el tráfico sin garantías de ancho de banda máximo, mínimo, retardo o jitter. Las aplicaciones que utilizan esta clase de servicio son todas aquellas que permiten un tratamiento best-effort. Todo tráfico de cliente correspondiente al tráfico de la red de detectores, será mapeado

a esta clase de servicio BEST-EFFORT para garantizar que nunca interfiera con el tráfico de CONTROL o GESTION.

Una vez marcado y clasificado el tráfico, los valores de etiquetado serán tomados como referencia en los distintos nodos de la red para proporcionar a las distintas clases de tráfico definidas el tratamiento adecuado, como pueden ser los tiempos de espera que estaría un paquete que contenga ciertos servicios frente a otros en caso de que el nodo o el enlace alcancen su capacidad máxima. De este modo cumplimos todos los criterios establecidos por ADIF para el tratamiento de los diferentes tráficos asociados a los servicios transportados por la Red Backbone MPLS en la Línea de Alta Velocidad Madrid - Levante.

2. GSM-R: El Sistema de Telecomunicaciones Móviles Ferroviarias Interoperable

2.1. Introducción

Cuando la Unión Europea se planteó cómo impulsar el uso del ferrocarril como medio de transporte tanto de personas como de mercancías en toda Europa, llegó a la conclusión de que era fundamental facilitar el paso de trenes entre un país y otro. Para ello, procedió a la redacción de las ETIs (Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad / Technical Specification for Interoperability), en las cuáles se especificaba cómo habrían de ser todos los elementos de un sistema ferroviario para que las redes de cada uno de los países fuesen interoperables, de tal forma que un tren pudiese circular libremente de un país a otro de la Unión. Primeramente, se realizaron las especificaciones para las Líneas de Alta Velocidad, y posteriormente también para Líneas Convencionales.

Una parte de estas ETIs es la que especifica la parte relativa al subsistema "Control y mando y señalización" (1), en la que se fija el sistema ERTMS (European Railway Traffic Management System / Sistema europeo de gestión del tráfico ferroviario) como el sistema a emplear para el control de las circulaciones ferroviarias. Dicho sistema tiene dos componentes fundamentales (2):

- ETCS (European Train Control System / Sistema europeo de control del tren): es un sistema ATP (Automatic Train Protection / Protección del Tren Automática) que reemplaza al sistema ATP nacional existente.

- GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railways / Sistema Global para Comunicaciones Móviles – Ferrocarriles): sistema radio que proporciona servicios de voz y datos. En este último caso, permite la comunicación entre los elementos de vía y la red.

De esta forma es como surge el sistema GSM-R, ante la necesidad del ERTMS de tener un sistema de comunicaciones radio que permita la transmisión de información entre los elementos de señalización y el tren vía radio, con objeto de transmitir información y órdenes. Para el desarrollo del GSM-R se evaluó qué tecnología radio utilizar, y tras diferentes estudios, se llegó a la conclusión de que la mejor solución sería utilizar como base una tecnología madura y de contrastada calidad sobre la cuál desarrollar el sistema, con objeto de utilizar equipos ya disponibles en el mercado y beneficiarse de la economía de escalas. Finalmente, se seleccionó el sistema GSM como tecnología base, y sobre dicho sistema se desarrollaron una serie de funcionalidades para cubrir las necesidades de los ferrocarriles.

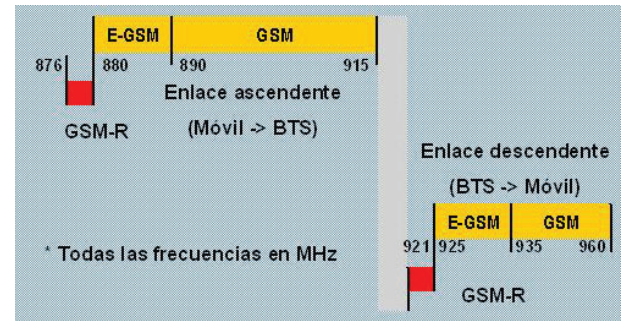
2.2. Evolución

De esta manera, aunque el sistema GSM-R surge como soporte para la transmisión de datos para ETCS, también proporciona servicios de voz, y, por lo tanto, se convirtió en el sucesor de los sistemas de comunicaciones analógicos de voz vía radio existentes hasta dicho momento en cada país, denominado Tren-Tierra en España.

Hasta entonces, a pesar de existir una ficha UIC en la que se especificaban las características del sistema, en la realidad en cada país existía un sistema basado en dicha ficha pero con características específicas que hacían incompatibles los móviles de un país con las redes de otros países, lo que obligaba a que si un tren circulaba por varios países, debía tener el equipo Tren-Tierra de cada uno de ellos.

Con la llegada de GSM-R se salva este problema, y además se da solución al problema de obsolescencia tecnológica que afectaba al sistema analógico. Asimismo, la situación comercial de este sistema consistía en que en cada país existía un único suministrador del mismo, lo que suponía un riesgo en la disponibilidad de equipos y un gran problema en las negociaciones económicas para cada nueva instalación.

Fig. 7.



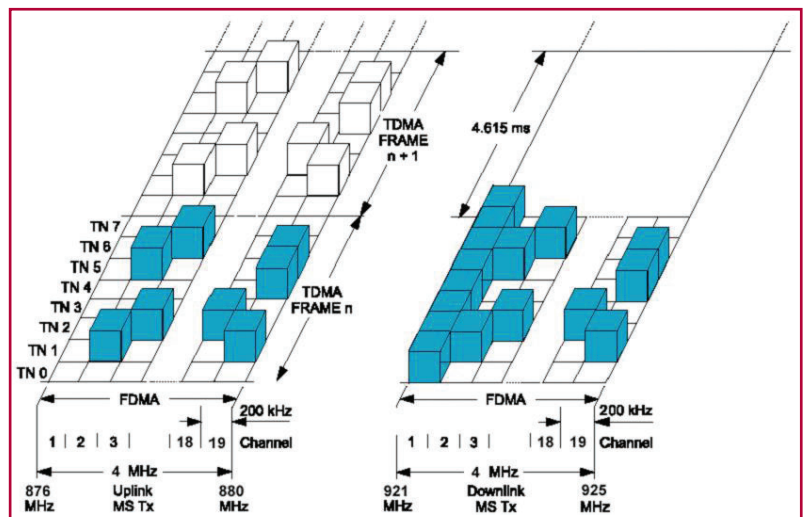
2.3. Características técnicas del sistema GSM-R

El sistema GSM-R tiene asignada de forma armonizada en toda Europa la banda de frecuencias 876-880 MHz / 921-925 MHz. Teniendo en cuenta que cada canal tiene un ancho de 200 kHz y que se utilizan unos canales de guarda en los laterales de la banda, se disponen de un total de 19 frecuencias para el sistema GSM-R (Fig. 7).

Mientras que el sistema analógico Tren-Tierra permite el establecimiento de una comunicación por cada frecuencia utilizada, el sistema digital GSM-R permite el establecimiento de hasta siete comunicaciones en cada frecuencia, mediante el uso de técnicas de multiplexación en el tiempo (TDM – Time Division Multiplexing / Multiplexación por División en el Tiempo). Realizando una adecuada reutilización de frecuencias, el número de canales disponibles en el sistema GSM-R es muy superior al del sistema analógico.

Recientemente se ha solicitado la ampliación de la banda asignada a GSM-R con la 873-876 MHz / 918-921 MHz, proporcionando 3 MHz adicionales a los 4 ya asignados. Esta solicitud ha venido motivada por los

Fig. 8.



problemas encontrados por ferrocarriles que hacen un uso extensivo del sistema GSM-R, sobre todo en grandes estaciones y terminales logísticas, donde el ancho de banda original no proporcionaba suficientes canales para el uso necesario (Fig. 8).

2.4. Funcionalidades del sistema GSM-R

Las redes GSM-R soportan los siguientes servicios:

— Servicios de voz:

- Llamadas punto a punto: Estas llamadas permiten el establecimiento de una comunicación de voz entre dos terminales GSM-R, o entre un terminal GSM-R y uno de la red fija (Fig. 9).

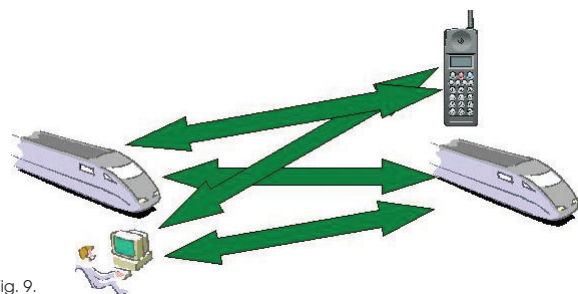


Fig. 9.

- Llamadas de emergencia pública: los móviles GSM-R pueden realizar llamadas de emergencia pública (112) tanto si están conectados a la red GSM-R como si no tienen acceso a la misma, en este caso conectándose a cualquier red pública GSM.
- Llamadas de difusión: mediante este servicio, se puede hacer llegar una llamada a un determinado grupo de móviles en una determinada zona, sólo pudiendo hablar quien originó la llamada. La llamada puede ser iniciada tanto por un usuario móvil GSM-R como por uno de la red fija (generalmente, un regulador) (Fig. 10).

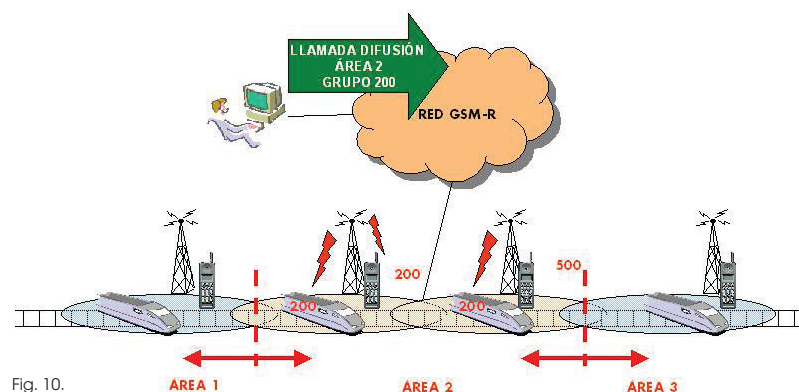


Fig. 10.

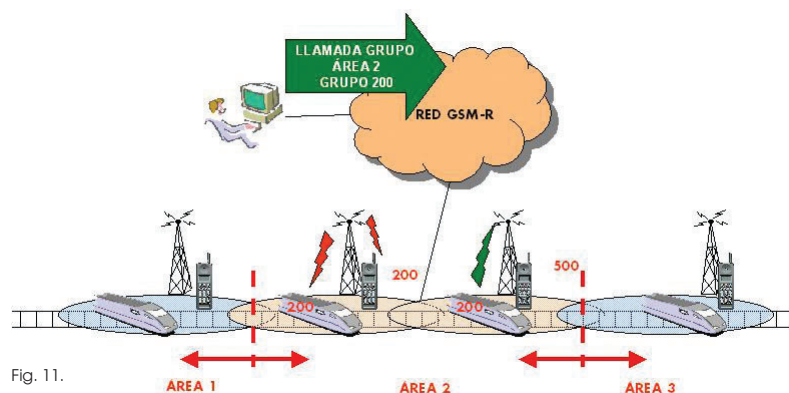


Fig. 11.

- Llamadas de grupo: mediante este servicio, se puede hacer llegar una llamada a un determinado grupo de móviles en una determinada zona, pudiendo hablar cualquiera de ellos por turnos. La llamada puede ser iniciada tanto por un usuario móvil GSM-R como por uno de la red fija (generalmente, un regulador) (Fig. 11).
- Multiconferencia (Fig. 12).

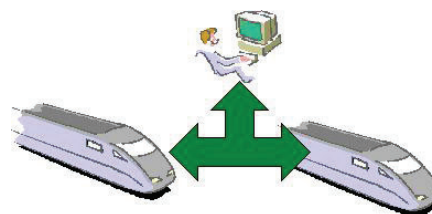


Fig. 12.

— Servicios de datos:

- Mensajes de texto
- Soporte para aplicaciones genéricas de datos (Fig. 13).

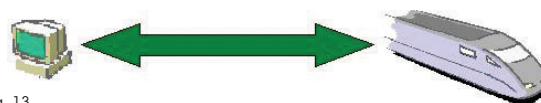


Fig. 13.

- Fax
- Soporte para aplicaciones de control de trenes
- Servicios relacionados con llamadas:
 - Grupo cerrado de usuarios
 - Prioridades y precedencia: mediante este servicio se puede dar prioridad a unos usuarios y tipos de llamadas frente a otros, y en caso de saturación de la red, terminar llamadas de menor prioridad para que se puedan establecer otras más prioritarias.
 - Llamada en espera, transferencia, encolado, etc
 - Bloqueo de llamadas entrantes o salientes: en base al tipo de usuario que realice o reciba una llamada, se puede prohibir o permitir el establecimiento de una llamada.

- Aplicaciones específicas ferroviarias:
 - Números funcionales: direccionamiento de una llamada en base a la función que desempeña un usuario: maquinista, seguridad, catering, mantenimiento, etc. (Fig. 14).



Fig. 14.

- Localización en base a la posición: en base a la posición que ocupa un Terminal, las llamadas pueden encaminarse a un destino u otro. Por ejemplo, para que un tren entre en comunicación con el regulador que le corresponde, no ha de conocer el número de teléfono del que le corresponde, sino siempre marcar el mismo número (1200, normalmente asignado a una tecla del terminal embarcado), y la red se encarga de enlutar la llamada en base a la posición en la que se encuentra el tren (fig. 15).

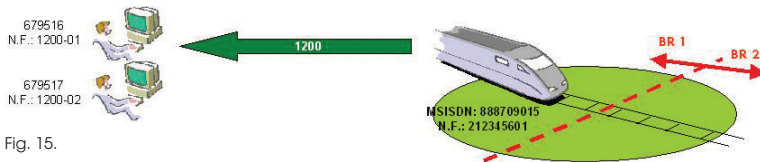


Fig. 15.

- Modo maniobras
- Comunicaciones entre múltiples maquinistas dentro del mismo tren
- Llamadas de emergencia ferroviaria

— Características específicas ferroviarias:

- Establecimiento de llamadas frecuentes o urgentes con una sola pulsación
- Mostrar la identidad funcional del llamante o llamado
- Establecimiento de llamadas rápido o garantizado
- Capaz de funcionar a velocidades de hasta 500 km/h

Asimismo, una red GSM-R puede conectarse a otras redes GSM-R y a la red fija privada ferroviaria, así como a otras redes públicas, tanto fijas como móviles.

2.5. Arquitectura de las redes GSM-R

Desde el punto de vista de elementos que forman una red GSM-R, su arquitectura es prácticamente la misma que la de una red GSM convencional, con algún elemento añadido específico para proporcionar al sistema las funcionalidades ferroviarias (Fig. 16).

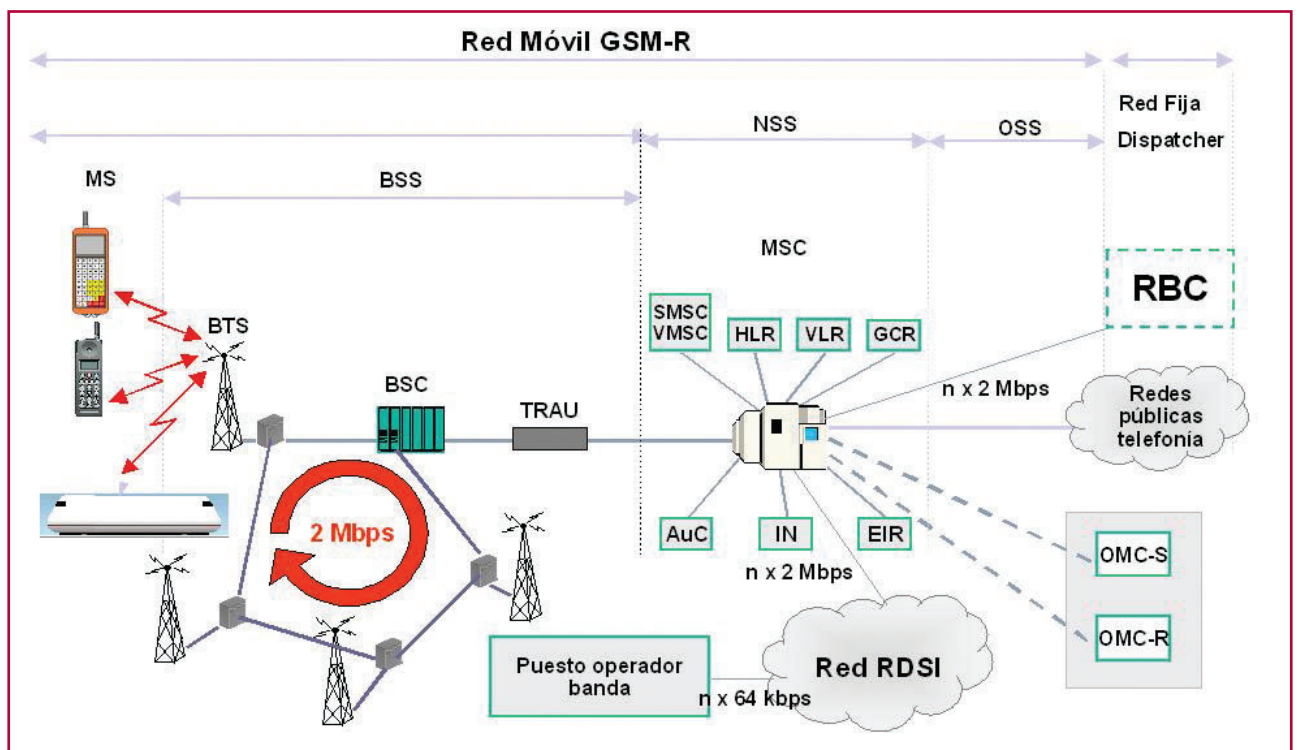


Fig. 16.

Los elementos que forman una red GSM-R son:

MS (Mobile Station - Estación Móvil)

Los terminales clientes de la red pueden ser de distintos tipos, pero se pueden agrupar en dos grandes grupos genéricos: terminales de mano y terminales embarcados.

Los terminales de mano son similares a los teléfono GSM empleados en el mercado público, y dependiendo del uso para el que son diseñados pueden clasificarse como:



Fig. 17.

GPH (General Purpose Handheld - Terminal de mano para Propósito General): Los terminales GPH están pensados para ser utilizados por personal ferroviario en un ambiente de trabajo no agresivo, pudiendo tener implementadas funcionalidades ferroviarias o no, dependiendo del trabajo del usuario. (Fig. 17)

OPH (Operational Purpose Handheld - Terminal de mano para Propósito Operativo): Los terminales OPH tienen implementadas las funcionalidades ferroviarias y además están diseñados para ser utilizados en un ambiente de trabajo agresivo, en el que el Terminal tenga que soportar golpes, humedad, etc. (Fig. 18).



Fig. 18.

OPS (Operational Purpose Shunting - Terminal de mano para Propósito Operativo de Maniobras): En el caso de que un terminal OPH además tenga implementadas funcionalidades necesarias en el desarrollo de maniobras con trenes, se denominan OPS (Fig. 19).



Fig. 19.

Los terminales embarcados, denominados cab-ra-dios, son utilizados por los maquinistas de los trenes para las comunicaciones de voz con el puesto de mando, otros trenes y usuarios. Se trata de equipos que tienen integrado un módem de voz y con una interfaz de uso específica para el uso por un maquinista (Fig. 20).

También existen módems de datos GSM-R, los cuáles se pueden integrar en equipos ETCS embarcados,



Fig. 20.



Fig. 21.

para proporcionar el canal de datos necesario para estos equipos. También es posible utilizarlos para otras aplicaciones que utilicen el sistema GSM-R para la transmisión de datos, tales como venta de billetes, anuncios a viajeros, etc. También existen terminales de datos que soportan GPRS, lo que permite la transmisión de información a mayores velocidades (fig. 21).

BTS (Base Transceiver Station - Estación Transceptora Base)

Son las estaciones base que se instalan en campo para proporcionar cobertura a lo largo de la traza. El equipo radio se suele instalar en una caseta o armario intemperie, donde se encuentran los equipos que le suministran energía, así como los equipos de transmisión que lo enlazan con su BSC. Asimismo, se instala una torre o mástil en la que se colocan las antenas que distribuyen la señal (Fig. 22).



Fig. 22. BSC (Base Station Controller - Controlador de Estaciones Base).

Encargado de gestionar un conjunto de BTSs, realizando la asignación de frecuencias y recursos radio. Asimismo, gestiona los procedimientos de paso de una BTS a otra (Handover – Traspaso), que tienen lugar cuando el móvil se desplaza.

TRAU (Transcoding and Rate Adaptation Unit – Unidad de adaptación de velocidades y transcodificación)

Realiza la adaptación de velocidades de canal utilizadas por las BTSs (16 kbps) y la MSC (64 kbps):

- **BSS (Base Station Subsystem – Subsistema de Estaciones Base):** Formado por las BTSs, BSCs y TRAU.
- **NSS (Network Switching Subsystem – Subsistema de Conmutación de Red)**
- **MSC (Mobile Switching Center – Centro de Conmutación Móvil):** Se encarga de establecer los canales de comunicación, entre los usuarios de red móvil y de estos con otras redes, empleando para ello el soporte del resto de nodos que conforman la NSS
- **SMSC (Short Message Service Center – Centro de Servicio de Mensajes Cortos):** Nodo encargado de la gestión de mensajes cortos. Cuando un mensaje es enviado por un móvil, este se almacena en el SMSC, y cuando el móvil destino se localiza, le es entregado, ya que si la entrega fuese realizada inmediatamente, fallaría en caso de que el terminal al que va destinado el mensaje no tuviera cobertura o estuviese apagado en ese momento
- **VMSC (Voice Mail System Center – Centro de Sistema de Correo de Voz):** Cuando se intenta establecer una comunicación con un usuario móvil y no es posible por alguna razón (sin cobertura, apagado, hablando, etc), la red puede almacenar un mensaje de voz que le deje el llamante, y posteriormente avisarle para que lo escuche.
- **HLR (Home Location Register – Registro de Localización Base):** Almacena toda la información del usuario: servicios permitidos, etc.
- **VLR (Visitors Location Register – Registro de Localización de Visitantes):** Gestiona la información de la localización de un usuario, para poder lo-

calizarle cuando alguien intente establecer comunicación con él.

- **GCR (Group Call Register – Registro de Llamadas de Grupo):** Almacena la información relativa a grupos y áreas necesarios para los servicios de llamadas de difusión, grupo y emergencia ferroviaria.
- **AuC (Authentication Center – Centro de Autenticación):** Almacena las claves privadas de los usuarios móviles utilizadas para encriptar las comunicaciones, y de esta forma asegurar la privacidad de las comunicaciones.
- **IN (Intelligent Network – Red Inteligente):** Encargada de gestionar funciones avanzadas de red, tales como la numeración funcional y la localización en base a la posición. Básicamente, realiza una traducción de números.
- **EIR (Equipment Identity Register – Registro de Identidad de Equipos):** Almacena la información de los terminales dados de alta en la red. En caso de robo o extravío de un terminal, es posible indicarle a la red que no le permita el acceso, inutilizándolo para ser usado.

OMC/NMC (Operation and Maintenance Center / Network Management Center)

Conjunto de equipos de gestión de la red:

- **OMC-S (Operations and Maintenance Center – Centro de operaciones y mantenimiento):** Equipos de gestión del subsistema de red (NSS).
- **OMC-R (Operations and Maintenance Center – Radio / Centro de operaciones y mantenimiento radio):** Equipos de gestión del subsistema radio (BSS).

Dependiendo de la forma en que se desplieguen las BTSs, se pueden definir distintas arquitecturas de cobertura radioeléctrica:

- **Capa simple:** Cada punto de la vía es cubierto por una única BTS (excepto en las zonas de solape). Todas las estaciones base dependen de una única BSC y MSC. En este caso no existe redundancia a nivel radio (Fig. 23).
- **Cobertura doble:** Cada punto de la vía es cubierto por dos BTSs. Todas las BTSs dependen de una única BSC y MSC. En este caso la redundancia existe a nivel radio de BTS (si una BTS deja de

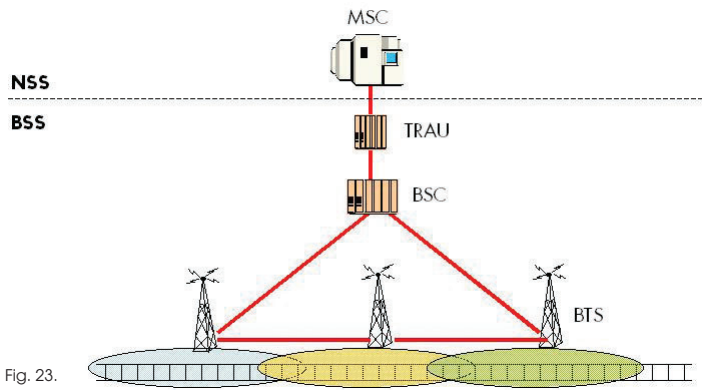


Fig. 23.

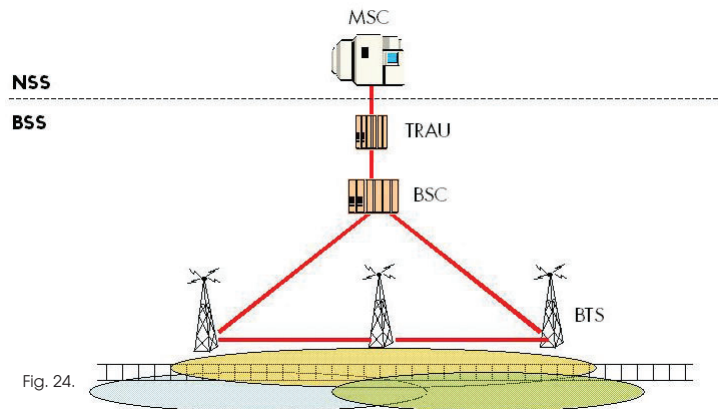


Fig. 24.

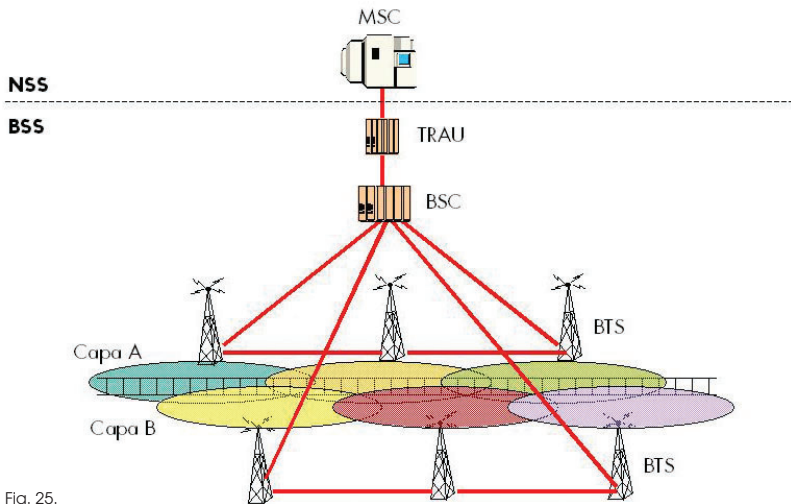


Fig. 25.

prestar servicio, sus colaterales proporcionan cobertura en su zona) (Fig. 24).

- **Capa doble a nivel de BTS:** Cada punto de la vía es cubierto por dos BTSs simultáneamente,

y todas las BTSs dependen de la misma BSC y MSC. La redundancia es a nivel radio de BTS (si una BTS deja de estar en servicio, su "espejo" proporciona cobertura en su zona) (Fig. 25).

- **Configuración de capa doble y 1 MSC:** Cada punto de la vía es cubierto por dos redes independientes a nivel radio (BTS, BSC y TRAU), estando conectadas a una misma MSC. En este caso la redundancia es total a nivel de subsistema radio. (Fig. 26).
- **Configuración de capa doble:** Cada punto de la vía es cubierto por dos redes independientes. La redundancia es total a nivel radio y de red. Todas las Líneas de Alta Velocidad de ADIF diseñadas para ERTMS nivel 2 han sido diseñadas y construidas con este tipo de arquitectura, que proporciona el mayor nivel de redundancia y fiabilidad (Fig. 27).

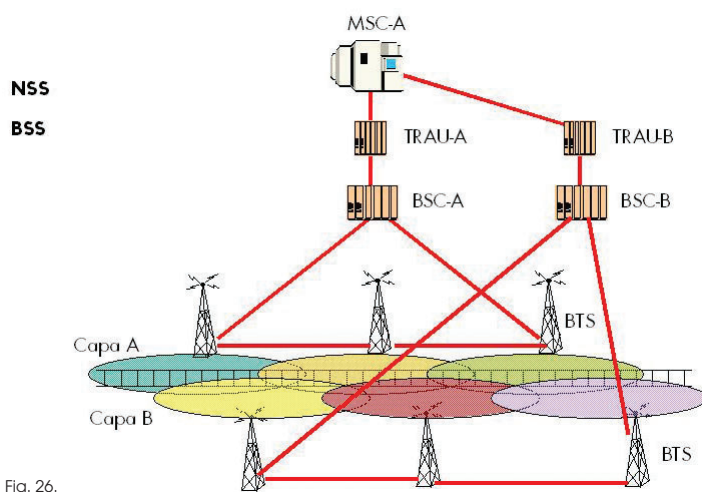


Fig. 26.

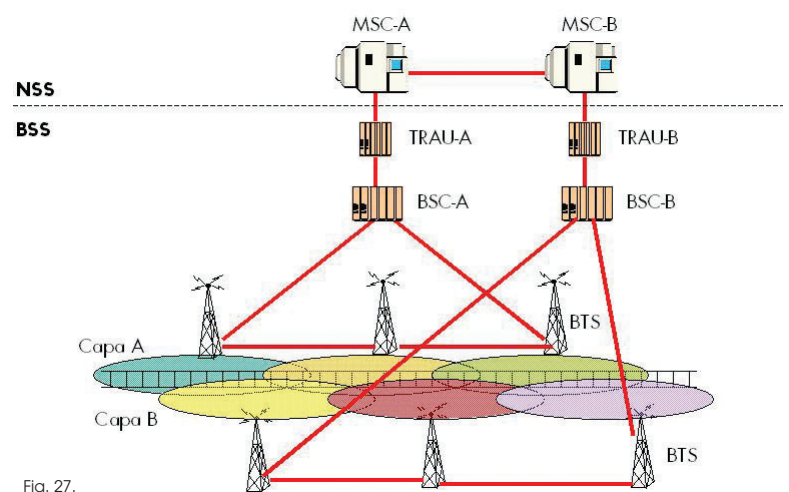


Fig. 27.

2.6. Normativa

Las normas de especificación de las redes GSM-R a nivel de la UIC son las siguientes:

- EIRENE Functional Requirements Specification v7.1 (3)
- EIRENE System Requirements Specification v15.1 (4)
- 0-2647 1 - GPH / OPH Fonctionnal tests & Validation
- ASCI Options for Interoperability v1
- FFFIS for GSM-R SIM Cards v4.1
- FFFIS for Confirmation of High Priority Calls v4
- FFFIS for Functional Addressing v4
- FFFIS for Location Dependent Addressing v4
- FFFIS for Presentation of Functional Numbers to Called and Calling Parties v4
- FIS for Confirmation of High Priority Calls v4
- FIS for Functional Addressing v5.1
- FIS for Location Dependent Addressing v3
- FIS for Presentation of Functional Numbers to Called and Calling Parties v4
- Radio Transmission FFFIS for EURORADIO

Además, existen una serie de documentos informativos:

- ERTMS/GSM-R Quality of Service Test Specification (5)
- Functional Requirements Specification for enhanced Location Dependent Addressing (eLDA)
- Interface Requirements Specification for enhanced Location Dependent Addressing (eLDA)

Los documentos normativos a nivel de ETSI son:

- EN 301515 v2.3.0 Requirements for GSM operation on railways
- TS 102610 v1.1.0 Usage of the User to User Information Element
- TS102281 Detailed requirements for GSM operation on Railways

2.7. Las redes GSM-R en España

En España, ADIF es el mayor administrador de infraestructuras ferroviarias, y el único que posee una red GSM-R completa, proporcionando cobertura GSM-R a un total de km, lo que incluye todas las Líneas de Alta Velocidad actualmente en servicio:

- Madrid-Barcelona-Figueras
- Madrid-Sevilla
- La Sagra-Toledo
- Córdoba-Málaga

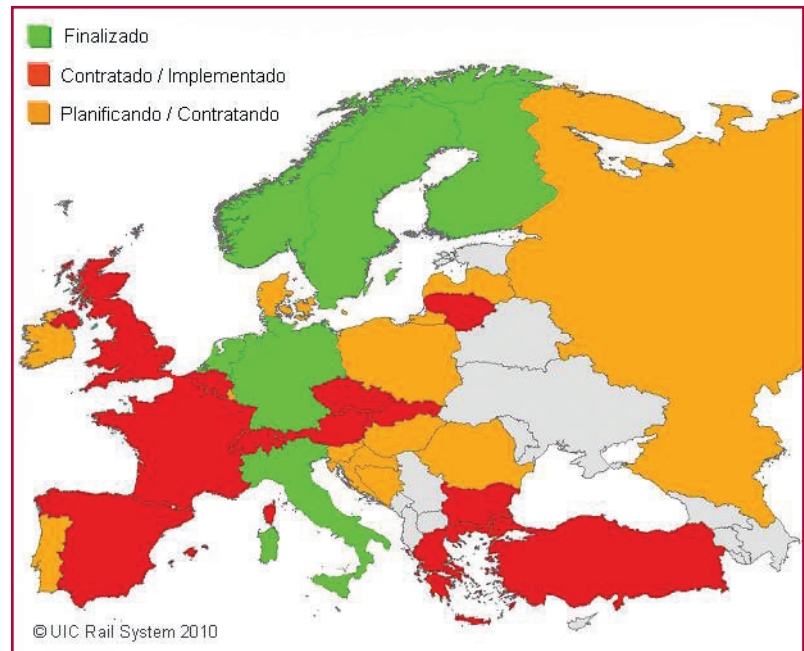


Fig. 28.

- Madrid-Valladolid
- Madrid-Levante
- Zaragoza-Huesca

así como en parte de las Líneas Convencionales:

- Cercanías de Bilbao
- Cercanías de Santander

Actualmente se está procediendo a la instalación del sistema en las líneas:

- LAV Orense-Santiago
- Cercanías de Madrid
- Cercanías de Barcelona

Además, la empresa TP Ferro, concesionaria de la sección internacional Figueras-Perpignan, dispone de un subsistema radio GSM-R (BTSS, BSC y TRAU), conectada a la NSS de ADIF, prestándole ADIF servicios de red GSM-R en base a un Convenio establecido entre ambas empresas.

2.8. Las redes GSM-R en el mundo

En la actualidad, la red GSM-R está en fase de implementación en toda Europa, estando completamente finalizada o habiendo realizado la mayor parte del despliegue en seis países (Fig. 28).

En la actualidad, de los 221.479 km de redes ferroviarias en Europa, está planificado instalar GSM-R en 150.653 km (el 68% de la red ferroviaria), estando en operación 68.500 km (el 45,5% de la red planificada).

Además, se han realizado instalaciones de GSM-R o se harán en el futuro próximo en otras redes ferroviarias fuera de Europa: Marruecos, Túnez, Arabia Saudí, China, Brasil, Australia...

2.9. La red GSM-R en la Línea de Alta Velocidad Madrid-Levante

El pasado mes de diciembre de 2010 se puso en servicio la Línea de Alta Velocidad Madrid-Levante. Parte integrante de las instalaciones de dicha línea han sido las de telecomunicaciones móviles GSM-R.

Se han instalado un total de 110 BTSs y 90 repetidores (para proporcionar cobertura en túneles), organizados en una arquitectura de red de doble capa, con objeto de cumplir con los requisitos de fiabilidad y disponibilidad necesarios para dar servicio al nivel 2 del sistema ERTMS. Estas instalaciones proporcionan cobertura desde la bifurcación de Torrejón de Velasco hasta Albacete y Valencia. Por lo tanto, los trenes que realizan viajes entre Madrid y Valencia reciben servicio en la primera parte del trazado por las instalaciones GSM-R de la LAV Madrid-Barcelona (desde la estación de Atocha hasta el by-pass entre las LAV Madrid-Barcelona y Madrid-Sevilla), a continuación por las de la LAV Madrid-Sevilla (desde dicho by-pass hasta el de Torrejón de Velasco), y finalmente por las nuevas instalaciones del Madrid-Levante.

Además de las BTSs y repetidores a lo largo de la traza, se han instalados 2 BSCs que dan servicio a

cada una de las capas. Una de ellas ha sido instalada junto a la MSC de capa A en Zaragoza, y la segunda junto a la MSC de capa B en Atocha. Para ello se han realizado labores de integración en la red existente, consistentes en ampliaciones y configuraciones de los elementos de la NSS (MSCs, GCR, red inteligente, etc).

Como parte final de la instalación, se han realizado pruebas de optimización para ajustar la red y posteriormente pruebas de calidad de servicio (QoS) para comprobar que la red cumple con los requisitos establecidos en la norma O-2475 que establece los valores a cumplir por una red GSM-R para poder ser utilizada como soporte radio para el transporte de la señalización del sistema ERTMS nivel 2.

Junto con las obras del sistema GSM-R, se han ejecutado las infraestructuras para las instalaciones de operadores de telefonía móvil pública. De esta forma, las torres de celosía instaladas para GSM-R han sido dimensionadas para poder soportar las cargas ejercidas por las antenas de GSM-R y de operadores, cumpliendo con el objetivo de compartición de infraestructuras, y de esta forma optimizar el coste económico de las mismas. Asimismo, junto a cada una de dichas torres, además de la caseta en la que se alojan los equipos de GSM-R, se ha instalado una caseta en la que los operadores han instalado sus equipos, proporcionándoles tanto la refrigeración de la misma como el suministro de energía para sus equipos. De esta forma, ADIF colabora con los operadores de telecomunicaciones móviles públicos para que puedan prestar servicios de comunicaciones de voz y datos (2G y 3G) a los usuarios del ferrocarril durante sus viajes. ♦

Referencias:

-(1) COMISIÓN EUROPEA. 2002/731/CE: Decisión de la Comisión, de 30 de mayo de 2002, sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa al subsistema "Control y mando y señalización" del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad mencionado en el apartado 1 del artículo 6 de la Directiva 96/48/CE (Texto pertinente a efectos del EEE) (notificada con el

número C(2002) 1947). Diario Oficial n° L 245 de 12/09/2002, p. 0037-0142.

-(2) European Railway Traffic Management System (ERTMS), UNIFE. Página Web <http://www.ertms.com>

-(3) EUROPEAN INTEGRATED RAILWAY RADIO ENHANCED NETWORK (EIRENE). UIC Project EIRENE. Functional Requirements Specification. versión 7.1. Paris: International Union of Railways, 2010. 107 p. ISBN: 2-7461-1831-7

-(4) EUROPEAN INTEGRATED RAILWAY RADIO ENHANCED NETWORK (EIRENE). UIC Project EIRENE. System Requirements Specification. Versión 15.1. Paris: International Union of Railways, 2010. 161 p. ISBN: 2-7461-1832-4

-(5) INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (IUC) and GSM-R Industry Group. O-2475 3.0 ERTMS/ GSM-R Quality of Service. Test Specification. 2007. 36 p.