Universitat Oberta de Catalunya

uoc.edu

Renovación de las líneas ferroviarias para el transporte inteligente de mercancías

José María Fernández Perrino
Máster de Ingeniería de Telecomunicación
Smart Cities

Víctor Monzón Baeza
Carlos Monzo Sánchez

10/06/2021

Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 España de Creative Commons

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	*Renovación de las líneas ferroviarias para el transporte inteligente de mercancías.*
Nombre del autor:	*José María Fernández Perrino*
Nombre del consultor/a:	*Víctor Monzón Baeza*
Nombre del PRA:	*Carlos Monzo Sánchez*
Fecha de entrega:	06/2021
Titulación:	*Máster de Ingeniería de Telecomunicación*
Área del Trabajo Final:	*Smart Cities*
Idioma del trabajo:	*Castellano*
Palabras clave	*Sistemas ferroviarios, logística inteligente, mercancías, señalización, comunicación tren-tierra.*

Resumen del Trabajo

El presente trabajo de fin de Máster tiene como intención principal proponer la modernización necesaria para recuperar las líneas ferroviarias antiguas o abandonadas. Como se justifica en el documento, el objetivo es poder destinar estas líneas al transporte exclusivo de mercancías, de forma que se permita a medio plazo el seguimiento completo y la trazabilidad continua de las mismas desde el origen hasta el destino, lo cual no es posible hoy en día. Se centra exclusivamente en las instalaciones en campo de señalización ferroviaria y telecomunicaciones, empleando las últimas tecnologías en uso en el territorio español.

Se centra en aplicar las nuevas tecnologías para gestionar el correcto funcionamiento de los sistemas de transporte público y privado de mercancías en una Smart City, mediante la interconexión interurbana de las mismas.

Este trabajo, pretende centrarse en dar un detalle con un nivel suficiente para poder desarrollar la infraestructura necesaria de señalización y comunicaciones que permita el paso de los trenes de mercancías, lo cual es normalmente responsabilidad del administrador de infraestructuras.

Se analiza de entrada el estado de las instalaciones actuales y el estado del arte de las tecnologías habitualmente empleadas. Posteriormente se realiza una selección de aquellas que se van a proponer para su instalación en base a criterios de funcionalidad y posteriormente, se realiza un estudio presupuestario, tomando como ejemplo una hipotética línea actualmente abandonada para su puesta en servicio de nuevo. Una vez concluida su viabilidad, el estudio podría servir para presentar a la Administración un

anteproyecto para su consideración técnico-económica.

Abstract (in English, 250 words or less):

The main intention of this Master's thesis is to propose the necessary modernization to recover old or abandoned railway lines. As justified in the document, the objective is to be able to allocate these lines to the exclusive transport of goods, so that in the medium term full monitoring and continuous traceability of them from origin to destination is allowed, which is not possible nowadays. It focuses exclusively on installations in the field of railway signalling and telecommunications, using the latest technologies in use in the Spanish territory.

It focuses on applying new technologies to manage the proper functioning of public and private freight transport systems in a Smart City, through their inter-urban interconnection.

This work aims to focus on providing a detail with a sufficient level to be able to develop the necessary signalling and communications infrastructure that allows the passage of freight trains, which is normally the responsibility of the infrastructure manager.

The state of the current facilities and the state of the art of the technologies commonly used are analysed from the outset. Subsequently, a selection is made of those that are going to be proposed for installation based on functionality criteria and later, a budget study is carried out, taking as an example a hypothetical line currently abandoned to be put into service again. Once its viability is concluded, the study could serve to present a preliminary draft to the Administration for its technical-economic consideration.

Índice

1 Introducción 1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo 1
1.2 Objetivos del Trabajo 2
1.3 Enfoque y método seguido 3
1.4 Planificación del Trabajo 3
1.5 Breve sumario de productos obtenidos 6
1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria 6
2 Estado del arte 7
2.1 Las Smart Cities y la evolución de las infraestructuras inteligentes 7
2.1.1 Evolución en los últimos 40 años del ferrocarril interurbano en España 7
2.1.2 Estaciones Inteligentes 9
2.1.3 Soluciones tecnológicas de los fabricantes 10
2.2 Logística Inteligente 11
2.2.1 Perspectiva del Operador Logístico 12
2.2.2 Perspectiva del Operador Ferroviario 14
2.2.3 Perspectiva del Administrador de Infraestructuras 16
2.3 Mercancías Ferroviarias 20
2.3.1 Directrices de la Unión Europea. 20
2.3.2 Tecnologías disponibles y en estudio para el transporte de mercancías a través del ferrocarril. 26
2.3.3 Efecto de supresión en la Circulación. 30
2.4 Tecnologías de señalización 32
2.4.1 Sistemas de Protección de Tren 32
2.4.2 Sistemas de Detección de Tren 45
2.5 Tecnologías telecomunicaciones ferroviarias 47
2.5.1 Comunicaciones Fijas 48
2.5.2 Comunicaciones Móviles 55
3 Desarrollo de la modernización de una línea ferroviaria abandonada 66
3.1 Presentación de la línea 66
3.2 Estado actual de la línea 70
3.3 Instalaciones y renovaciones propuestas 73
3.3.1 Instalaciones de señalización 73
3.3.2 Sistema de protección de tren 74
3.3.3 Control de Tráfico Centralizado (CTC) 75
3.3.4 Telecomunicaciones Fijas 75
3.4 Estudio Presupuestario 77
4 Conclusiones 87
4.1 Técnicas 87
4.2 Económicas 87
4.3 Generales 88
4.4 Líneas de trabajo futuras 89
5 Glosario 91
6 Bibliografía 92

Lista de figuras

1 - Planificación 5
2 - Sistema de SICK para el seguimiento de trenes 11
3 - Vista en tiempo real de posicionamiento de barcos 13
4 - Madrid Abroñigal [9] 15
5 - CTC y Malla Ferroviaria 19
6 - Actores del transporte de mercancías ferroviarias 23
7 - Reparto de transporte de mercancías en la UE 24
8 - Reparto del tráfico de mercancías por país en la UE 25
9 - Semirremolque de KRONE 27
10 – Reproducción a escala de vagón poche de ÖBB 27
11 - Sistema Modalohr en uso 28
12 - Sistema Megaswing en uso 29
13 - Ejemplo de carretera rodante 30
14 - Ejemplo de malla ferroviaria con tráfico mixto 31
15 - Marmita enclavada con cerradura Bouré 33
16 - Mesa de enclavamiento mecánico de una estación 34
17 - Cableado geográfico y cabina de relés 35
18 - Enclavamiento Electrónico de CAF 36
19 - Terminal de Operador 37
20 - Frecuencias de resonancia según el aspecto de la señal 38
21 - Colocación de balizas ASFA 39
22 - Subsistemas básicos del ERTMS 40
23 - Plano de señal modular de LED 42
24 - Accionamiento de aguja 43
25 - Cable de cuadretes de Cervi homologado para ADIF 44
26 - Estructura del TCM100 de SIEMENS 46
27 - Sistema de contadores de ejes de Electrans 47
28 - Redes SDH de acceso STM1/4 en a RFIG 49
29 - Redes SDH troncales en la RFIG 51
30 - Interacción de redes de acceso y troncales 52
31 - Ejemplo de topología de red IP en redes regionales ferroviarias 54
32 - Esquema de conexiones del sistema Tren-Tierra 56
33 - Esquema de emisión alternada 58
34 - Esquema de emisión isofrecuencia 58
35 - Esquema del sistema de control del Tren-Tierra 60
36 - Relación de funciones del sistema GSM-R 61
37 - Potenciales servicios del sistema GSM-R 63
38 - Banda de frecuencias del Sistema GSM-R 64
39 - Elementos particulares de una red GSM-R 65
40 - Esquema conceptual de la línea a renovar 66
41 - Tira de vía de la línea a renovar 69
42 - Instalaciones ferroviarias vandalizadas 71
43 - Tabla resumen de características de las estaciones 72
44 - Configuración en anillo de la red GSM-R 77
45- Coste por sistema de la renovación 83
46 - Coste proporcional del sistema GSM-R respecto al total 84

47 - Presupuesto preliminar de la renovación de la estación de Abando 85
48 - Tabla comparativa de costes de telecomunicaciones en obras 86

1 Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Dentro del campo de las Smart Cities, la Smart Mobility genera un importante volumen de negocio en España, que va en aumento año tras año.

El desarrollo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) incide en todos los ámbitos de la sociedad. Esta transformación digital, que tiene un carácter disruptivo en la movilidad y el transporte, supone una nueva revolución industrial y provoca un cambio de paradigma: la Movilidad 4.0. Esta debe abordar temas tan importantes como la sostenibilidad ambiental, social y económica, la introducción de zonas de bajas emisiones, los peajes urbanos y la euroviñeta, la movilidad como servicio (Maas, del inglés Mobility as a Service), el e-commerce y la problemática de la distribución de mercancías de última milla (microplataformas logísticas), el futuro de los vehículos conectados y autónomos, la electromovilidad o la irrupción de los vehículos de movilidad personal (VMP), entre otros.

Para dar respuesta a la interconexión de Smart Cities, se plantea el presente trabajo que analiza la continuidad y trazabilidad de las mercancías ferroviarias de la Smart Mobility en el ámbito interurbano.

El Reglamento (UE) 913/2010 del Parlamento Europeo y del Consejo de 22 de septiembre de 2010 sobre una red ferroviaria europea para un transporte de mercancías competitivo [1] estableció una serie de corredores europeos de mercancías para aumentar la competitividad del ferrocarril frente a otros medios de transporte.

En España tenemos el Corredor Atlántico y el Corredor Mediterráneo, que se prevé tengan una gran cantidad de demanda, tanto de pasajeros, como de mercancías [2]. Es previsible que en algún momento puedan llegar a colapsarse por su dedicación mixta (pasajeros y mercancías), debido principalmente al Efecto de Supresión en la Circulación Ferroviaria.

Por otra parte, desde hace varias décadas, se han ido abandonando líneas ferroviarias por no ser rentables, debido especialmente al éxodo y la despoblación rural, pero también por la apuesta por el transporte de mercancías por carretera. Éstas han sido vandalizadas y se encuentran obsoletas para su recuperación inmediata. Sin embargo, son físicamente aprovechables como alternativa secundaria al transporte de mercancías nacional o local, dotándolas de las instalaciones de seguridad y comunicaciones adecuadas.

Al mismo tiempo, los clientes cada vez solicitan a las empresas tener un mayor control sobre el estado de sus productos y el cumplimiento de los plazos acordados. Las mercancías requieren de una mayor trazabilidad y el seguimiento de estas se ha vuelto habitual en las transacciones a nivel mundial. Sin embargo, cuando una mercancía entra en las instalaciones del transportista, no se puede conocer a ciencia cierta en qué punto concreto se encuentran, ni cuanto tiempo tardarán en llegar a la siguiente base de reparto, salvo por estimaciones basadas en la rutina.

Se ha detectado que técnicamente es viable conocer en todo momento la ubicación de una mercancía que sea transportada en tren por la RFIG con la tecnología existente, lo cual podemos llamar “mercancías inteligentes”.

Se ha considerado en este trabajo que la perspectiva de mercancías inteligentes engloba 3 aspectos:

- La infraestructura necesaria que permita el paso de los trenes de mercancías (responsabilidad del administrador de infraestructuras).
- Los trenes adaptados que permitan la trazabilidad de las mercancías que transportan (operador ferroviario).
- La infraestructura lógica o Software que permita el seguimiento continuo de las mercancías (operador logístico).

En este momento (y todo apunta a que así seguirá siendo), los 3 actores están separados y cada uno debe adecuar sus instalaciones y equipos para permitir dicha integración.

Este proyecto, pretende centrarse en dar un detalle con un nivel suficiente para poder desarrollar el primero de los 3 aspectos descritos.

1.2 Objetivos del Trabajo

Se pretende en este estudio aportar una alternativa al transporte inteligente de mercancías mediante la renovación de líneas en desuso, de forma que puedan ser interoperables en el marco del cuarto paquete ferroviario, según la Directiva (UE) 2016/797, de 11 de mayo de 2016, sobre la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Unión Europea.

Finalmente, para ver si esto es posible se ha considerado interesante hacer una valoración real de una línea abandonada, de manera que puedan extraerse las conclusiones más apropiadas y ajustadas a las necesidades, tanto del tráfico de mercancías en sí, como de la situación económica global.

Así pues, podemos enumerar los objetivos siguientes de este trabajo:

- Crear una metodología general de estudio para la cuantificación del presupuesto necesario destinado a recuperar las líneas en desuso para el tráfico exclusivo de mercancías – Capítulos de señalización y telecomunicaciones.

- Estudiar las alternativas tecnológicas actuales y valorar las más adecuadas para la gestión de la trazabilidad continua de las mercancías, tanto técnica como económicamente.
- Aportar una solución al problema de la trazabilidad de mercancías ferroviarias desde la perspectiva del administrador de las infraestructuras.
- Estudiar la viabilidad de renovar líneas actuales en desuso o abandonadas para el tráfico de mercancías principalmente. Determinar si pueden enmarcarse en un contexto interoperable o sólo a nivel nacional.

1.3 Enfoque y método seguido

Partiendo del estudio holístico del seguimiento de las mercancías en el contexto ferroviario, se realiza una visión general tanto de las tecnologías de las instalaciones de seguridad y telecomunicaciones ferroviarias, como de la tendencia en los vehículos ferroviarios necesarios para realizarlo.

A partir de este análisis técnico, se toma una línea ferroviaria de ejemplo sobre la que poder elaborar una síntesis práctica de cara a crear una metodología para su renovación, incluyendo su valoración económica, de manera que se pueda determinar la viabilidad de la actuación.

Poder estudiar el asunto desde un punto de vista general e ir particularizando nos permite entender si la necesidad detectada queda cubierta con estas propuestas tecnológicas o es preciso tomar otras líneas de trabajo.

En este caso, por razones de dimensionamiento, sólo se toma una línea ferroviaria de ejemplo, pero el estudio podría servir para determinar la viabilidad de cualquier otra línea y, tras varias iteraciones, para incluso pode llegar a una conclusión general sobre si es rentable recuperar viejas líneas o no.

1.4 Planificación del Trabajo

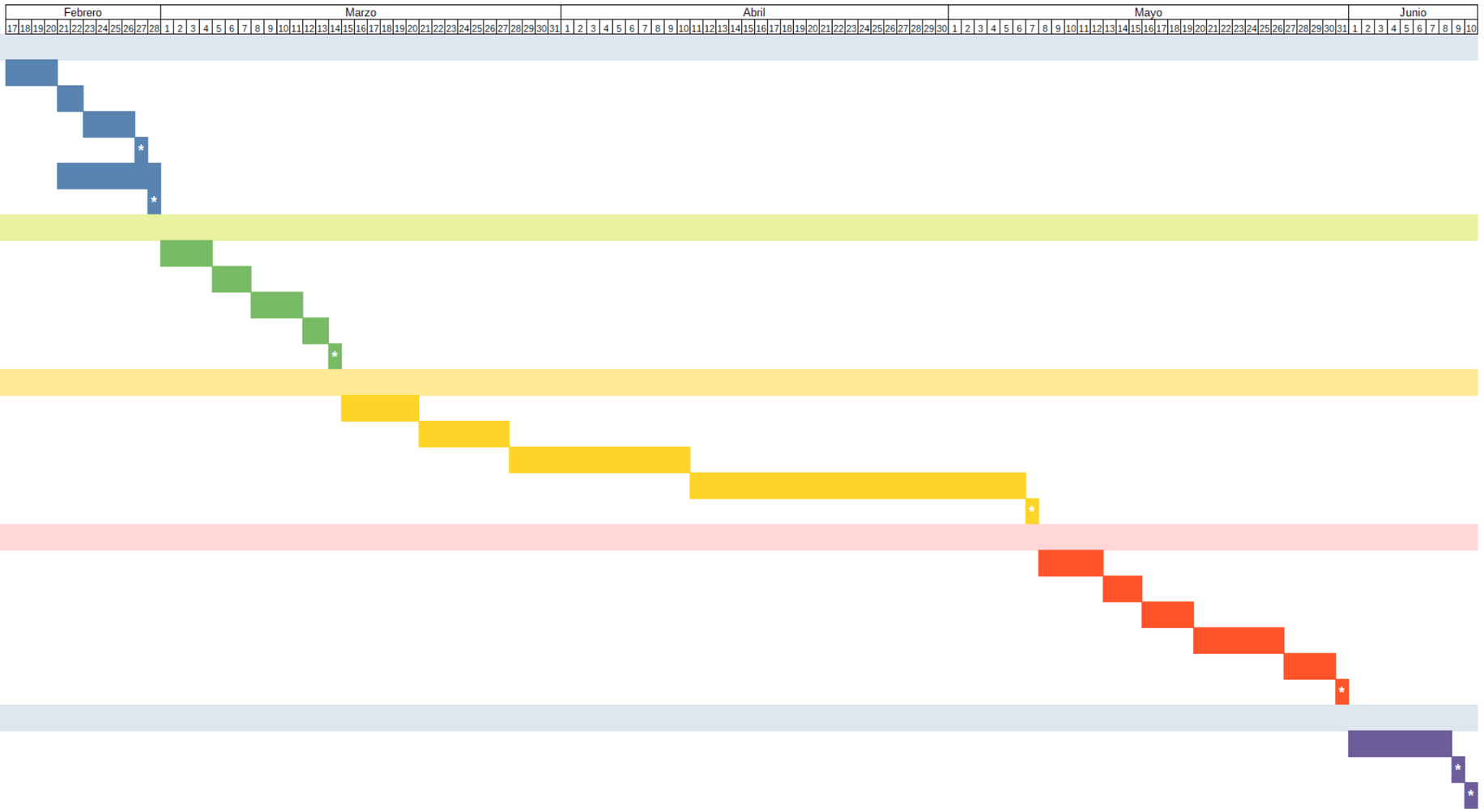
En este trabajo se le quiere dar mucha importancia a la planificación y a la continua revisión del alcance, ya que, por las características del mismo, es muy fácil que se vea desbordado por las limitaciones de tiempo.

Se trata de un estudio que en condiciones laborales reales puede llevar mucho tiempo hacer y requerir una gran cantidad de recursos. Es por ello que se va a intentar limitar el alcance y cumplir todas las metas para no perder el foco.

Los recursos son muy simples, ya que únicamente se empleará la información recopilada en la bibliografía, sin necesidad de emplear programas especiales o materiales físicos que requieran un tratamiento diferente al recogido en los medios de ofimática habituales.

En la siguiente página se adjunta un diagrama de Gantt auto explicativo con las tareas previstas y la duración estimada:

Tarea	Inicio	Fin	Días
ENTREGA PARCIAL 1			
Recopilación de normativa e información previa	17/02/21	20/02/21	4
Detección de la necesidad	21/02/21	22/02/21	2
Planteamiento de objetivos	23/02/21	26/02/21	4
Planificación	27/02/21	27/02/21	1
Resumen ejecutivo del trabajo (capítulo 1)	21/02/21	28/02/21	8
Entrega en la plataforma de la UOC			1
ENTREGA PARCIAL 2			
Estado de la Logística Inteligente	01/03/21	04/03/21	4
Estado de las Mercancías Ferroviarias	05/03/21	07/03/21	3
Estado de la Tecnología (IISS)	08/03/21	11/03/21	4
Estado de la Tecnología (Telecomunicaciones)	12/03/21	13/03/21	2
Entrega en la plataforma de la UOC	14/03/21	14/03/21	1
ENTREGA PARCIAL 3			
Presentación de la línea ferroviaria	15/03/21	20/03/21	6
Estado actual de las instalaciones	21/03/21	27/03/21	7
Renovaciones propuestas	28/03/21	10/04/21	14
Estudio Presupuestario	11/04/21	06/05/21	26
Entrega en la plataforma de la UOC	07/05/21	07/05/21	1
ENTREGA PARCIAL 4			
Revisión de formato	08/05/21	12/05/21	5
Revisión de cumplimiento de objetivos	13/05/21	15/05/21	3
Revisión de bibliografía y glosario	16/05/21	19/05/21	4
Redacción de conclusiones	20/05/21	26/05/21	7
Re-edición, si es necesario	27/05/21	30/05/21	4
Entrega en la plataforma de la UOC	31/05/21	31/05/21	1
ENTREGA PARCIAL 5			
Elaboración de la presentación	01/06/21	08/06/21	8
Entrega en la plataforma de la UOC	09/06/21	09/06/21	1
Entrega en la plataforma de la UOC	10/06/21	10/06/21	1



1 - Planificación

1.5 Breve sumario de productos obtenidos

Los productos obtenidos mediante la presente memoria son los siguientes:

- Un compendio general de las tecnologías existentes en el ámbito de las instalaciones de seguridad y telecomunicaciones ferroviarias.

- Unos criterios para seleccionar los más oportunos según la intención perseguida: permitir el tráfico exclusivo de mercancías inteligentes.

- Una metodología para elaborar el presupuesto básico de renovación de las instalaciones de seguridad y telecomunicaciones de líneas ferroviarias obsoletas o abandonadas.

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

En el capítulo 2, se realiza una **presentación general** del estado técnico de las mercancías inteligentes, su contexto ferroviario y las tecnologías de seguridad y comunicaciones existentes que actualmente dan respuesta a las necesidades de seguridad y circulación ferroviarias, estando instaladas en la RFIG.

En el capítulo 3, se toma un tramo de una **línea ferroviaria concreta** que servirá de ejemplo con el fin de poder elegir las tecnologías más adecuadas y valorar cuantitativamente las necesidades para su adaptación al paso de trenes con mercancías inteligentes. De esta forma se pondrán las bases de los criterios generales necesarios para extrapolarlos a otras líneas con las mismas características.

En el capítulo 4, se expondrán las **conclusiones** del trabajo concreto realizado en el capítulo anterior, tanto las técnicas como las económicas, que den paso a determinar la viabilidad de emprender la reforma de la línea en cuestión. Posteriormente se analizará el cumplimiento de los objetivos propuestos en el capítulo 1.2 y se propondrán las líneas de trabajo futuras.

El Glosario y la Bibliografía simplemente aportan las referencias necesarias para la comprensión completa del trabajo realizado y su posible extensión, en caso de ser necesarias.

2 Estado del arte

A continuación, se hace un análisis y estudio detallado de la situación en cuanto a los dos asuntos principales sobre los que gira el trabajo. Por una parte, se describen los aspectos principales sobre la logística inteligente por ferrocarril y por otra parte, sobre las tecnologías propias de los sistemas de seguridad y comunicaciones de la infraestructura ferroviaria.

2.1 Las Smart Cities y la evolución de las infraestructuras inteligentes

Para enmarcar el trabajo dentro de las Smart Cities, es necesario saber primero de dónde se viene y cuáles son las últimas novedades en la *Smart Mobility* (Movilidad Inteligente), de forma que se entiendan plenamente los objetivos propuestos.

Se hace a continuación una referencia muy breve a ciertos contextos que debemos tener en cuenta para luego introducir la trazabilidad inteligente de mercancías interurbanas en el ámbito ferroviario:

2.1.1 Evolución en los últimos 40 años del ferrocarril interurbano en España

Un aspecto esencial de la organización de la red ferroviaria española, y de su incidencia en las ciudades, fue el hecho de que su trazado se hizo generalmente por compañías privadas que construyeron líneas concretas en relación con sus propios intereses y estrategias. Dichas empresas, como por ejemplo la Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España, la Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante o la Compañía del Ferrocarril de Córdoba a Sevilla, no tuvieron un plan de conjunto ni objetivos claros en cuanto a la articulación de una red regional o nacional; cada compañía adoptaba su propia estrategia en el diseño de las líneas, y generalmente en competencia mutua.

De manera general, el ferrocarril acabó conectando los núcleos más poblados y dinámicos. La lógica del trazado ferroviario en el conjunto del territorio español se ha puesto en relación con el papel de las comarcas más asociadas al proceso de industrialización. Las regiones menos pobladas y de menor actividad económica no eran atractivas para la inversión de las compañías, por la escasa rentabilidad prevista. En estos casos las presiones locales y las ayudas públicas fueron fundamentales.

Tras una inversión importante en la construcción de una red ferroviaria potente desde sus orígenes en 1837, en los años 80 se plantea la rentabilidad económica de la misma [3].

Basándose en que el 68% del tráfico ferroviario se realizaba en 5.000 de los 13.500 km de vía de la red, se elabora un plan, dentro del contrato programa acordado con el gobierno, para ir cerrando aquellas líneas que no sean

rentables económicamente, olvidando en gran medida la rentabilidad social del ferrocarril.

En enero de 1985, siendo ministro de fomento Enrique Barón, se clausuraron 914 km de ferrocarril que afectaban a 12 líneas y 132 estaciones, mientras que otros 933 km se mantuvieron para el servicio exclusivo de mercancías.

Con el nuevo sistema político, ya en democracia, FEVE, que todavía sigue arrastrando una grave crisis, cederá a algunas autonomías la gestión de varias de sus líneas. La primera iba ser Cataluña en 1979, que para hacerse cargo de las nuevas líneas constituirá la empresa Ferrocarriles de la Generalidad de Cataluña (FGC). En el País Vasco se crea Euskotren en 1982, seguida de Ferrocarriles de la Generalidad Valenciana (FGV) en 1986 y de Servicios Ferroviarios de Mallorca (SFM) en 1994, organismos que recibieron la gestión de los ferrocarriles de vía estrecha, tranvías o suburbanos a medida que las autonomías fueron recibiendo las competencias en esta materia. FEVE va a emprender una profunda renovación de material y enfocar sus servicios en el ámbito de cercanías y, partir de 1983, un servicio estrella como será el tren turístico Transcantábrico.

En 1987 se aprobó el Plan de Transporte Ferroviario, que tenía como objetivo conseguir velocidades por encima de los 200 km/h, para lo que se realizaron obras de mejora de las líneas. En este sentido, el objetivo principal era lograr el establecimiento de una doble vía a 200 km/h en el triángulo Madrid-Barcelona-Valencia, de los que mayor tráfico soporta.

Los cambios de costumbres, con el crecimiento de la población urbana y en especial de las periferias, hacen que se incremente espectacularmente el tráfico de cercanías, lo que llevaría a la necesidad de efectuar importantes inversiones. Así pues, comienza a desarrollarse un importante servicio de Cercanías en las ciudades más importantes del país: Se inauguran las redes de Madrid, Barcelona, Valencia, Bilbao o Málaga.

En abril de 1992 se inaugura la primera línea de alta velocidad en España, la línea Madrid-Sevilla. Esta infraestructura está integrada en las obras para favorecer el desarrollo del sur español y de la Exposición Universal de Sevilla de 1992. El nombre de esta nueva infraestructura, que se construye con ancho de vía europeo internacional, es de AVE, Alta Velocidad Española. El AVE llega a alcanzar los 300 km/h.

El Plan Director de Infraestructuras que se puso en marcha en los años 1990 con un plazo de 15 años, pone en marcha, aparte del mantenimiento de la red básica, la extensión de la red de alta velocidad de ancho internacional.

En noviembre de 2003 se publicó la Ley del Sector Ferroviario, que da visos de realidad a la liberalización del sector y que implicó el fin del monopolio del transporte ferroviario que imperaba en España desde finales de la guerra civil. Es posible que ello acabe de nuevo en el cierre de líneas menos rentables para las compañías privadas.

La construcción de las líneas de Alta Velocidad continuó y en algunos casos se concluyeron: En 2005 se inauguró la línea de alta velocidad La Sagra-Toledo, que sustituía a la antigua línea de ancho ibérico; A finales de 2007 fueron inauguradas la línea de alta velocidad Madrid-Segovia-Valladolid, la Córdoba-Málaga y el tramo Lérida-Tarragona de Alta velocidad. A comienzos de 2008 los primeros trenes AVE llegaron a la Estación de Barcelona-Sants, diez años después de que comenzaran las obras. En 2010 se inauguró otra gran obra, la Línea de alta velocidad Madrid-Levante. El estreno de este nuevo ferrocarril implicó la entrada en servicio de nuevas estaciones adaptadas para los servicios AVE: la Estación de Valencia-Joaquín Sorolla o la Estación de Cuenca-Fernando Zóbel.

Desde abril de 2012 el Ferrocarril directo Madrid-Burgos, que en los últimos años se encontraba en una franca decadencia, dejó de prestar servicio en todo su trazado debido a unos desprendimientos de roca que acabaron provocando el cierre de la línea.

Debido en parte a la crisis económica, en mayo de 2013 el Ministerio de fomento decidió suprimir 48 líneas de Media distancia operadas por Renfe operadora que no resultaban económicamente rentables y que acumulaban déficit. Otras líneas de ancho ibérico han sufrido en los últimos años una drástica reducción en la frecuencia y calidad de sus servicios, especialmente en aquellas que afectan a Extremadura.

2.1.2 Estaciones Inteligentes

En línea con una de las definiciones principales de las *Smart Cities*, un sistema complejo e interconectado que aplica las nuevas tecnologías para gestionar el funcionamiento eficiente e integrado de los sistemas de transporte público y privado, surge la idea de las Estaciones ferroviarias Inteligentes.

La Asociación Española de Normalización, UNE, ha publicado en 2019 la norma que define un nuevo modelo de estaciones de ferrocarril inteligentes, denominada UNE 178109 ‘Ciudades Inteligentes. Estación inteligente y conexión con la plataforma de ciudad inteligente’ [4].

La nueva norma tiene el propósito de guiar y facilitar la transformación de las estaciones ferroviarias de viajeros en estaciones inteligentes, aumentando su nivel de usabilidad, mejorando su gestión y creando servicios de valor añadido para la ciudadanía, explican desde Adif.

Su objetivo es establecer los criterios y características mínimas necesarias para considerar una estación como ‘inteligente,’ así como los requisitos para incorporar las estaciones inteligentes como un ente característico dentro del ecosistema de ‘ciudad inteligente’ que cumpla con la norma UNE 178104.

En ella se indica que las estaciones están inmersas en un proceso de transformación activa basado en la innovación aplicada y la tecnología que permitirá mejorar su gestión con el fin de aumentar su sostenibilidad,

seguridad, usabilidad y accesibilidad, así como mejorar la experiencia del viajero y la del resto de la ciudadanía que utiliza los servicios de la estación.

Modelando y normalizando la estación inteligente se logra crear una estación más personal, orientada a las necesidades de cada ciudadano, y más próxima, incrementado su calidad de vida y su satisfacción en relación con la prestación de servicios públicos.

La norma contribuye, además, a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, en particular los objetivos 9 (Industria, innovación e infraestructuras) y 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles).

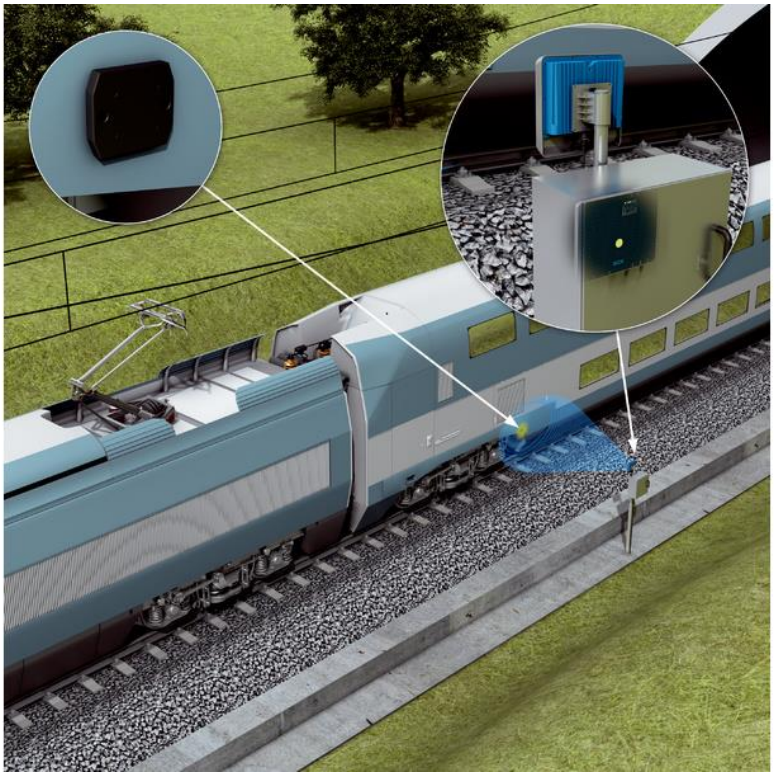
2.1.3 Soluciones tecnológicas de los fabricantes

A falta de unos criterios claros por parte de la Administración, como los que pretende definir este TFM, para facilitar el seguimiento de los trenes de mercancías a los operadores logísticos, el mercado se ha lanzado a proponer soluciones aisladas que suplan la carencia.

Por ejemplo, SICK [5], en base a su propia definición de logística inteligente ha propuesto un sistema para la identificación de los trenes de forma paralela e independiente a la que realiza el operador ferroviario, de modo que asegura poder realizar el seguimiento de las mercancías a lo largo de la vía mediante la identificación de vehículos sobre carril vía RFID,

El dispositivo de lectura y escritura RFID robusto, toma lecturas fiables del transpondedor, instalados en los trenes que circulen. Por medio de los sensores de ejes adicionales se puede registrar la velocidad del tren y las distancias entre ejes. También se puede asignar los resultados de medición de los sistemas Wayside Train Monitoring a cada una de las ruedas. De este modo se pueden detectar tendencias y tomar medidas de mantenimiento preventivas.

En la figura siguiente, proporcionada por el fabricante, se puede ver el concepto desarrollado:



2 - Sistema de SICK para el seguimiento de trenes

2.2 Logística Inteligente

Después de haber visto someramente en el capítulo anterior la evolución de las infraestructuras ferroviarias de mercancías en el marco de las *Smart Cities*, desde su origen hasta las últimas tendencias, ahora, para ubicar nuestro objetivo, debemos repasar cómo entronca aquello con el creciente mercado de la logística inteligente y su estado actual.

Es notorio que los consumidores demandamos, cada vez más servicios personalizados que se adapten a nuestras necesidades. Con la actual situación mundial, el comportamiento del consumidor está cambiando y es necesario un servicio más personalizado.

La logística inteligente consiste en optimizar y mejorar todos los procesos que conforman la cadena de suministros (almacenaje, distribución, abastecimiento) mediante el uso de tecnología y la digitalización de todos los procesos de este. Todo con el fin de ofrecer un servicio de lo más personalizado a sus clientes [6]. En resumen, se trata de usar la tecnología con sentido, de comunicar los eventos a los actores y de automatizar los procesos sin olvidar la entrega a tiempo del producto.

Tanto en un puerto para contenedores, en el tráfico ferroviario, en los almacenes o en el aeropuerto, los sistemas de seguimiento pueden asegurar una capacidad de rastreo total de las mercancías. Los sistemas de los campos de la asistencia al conductor, la supervisión del movimiento y la seguridad proporcionan un transporte sin problemas.

Algunas de las ventajas más patentes de la logística inteligente son las siguientes:

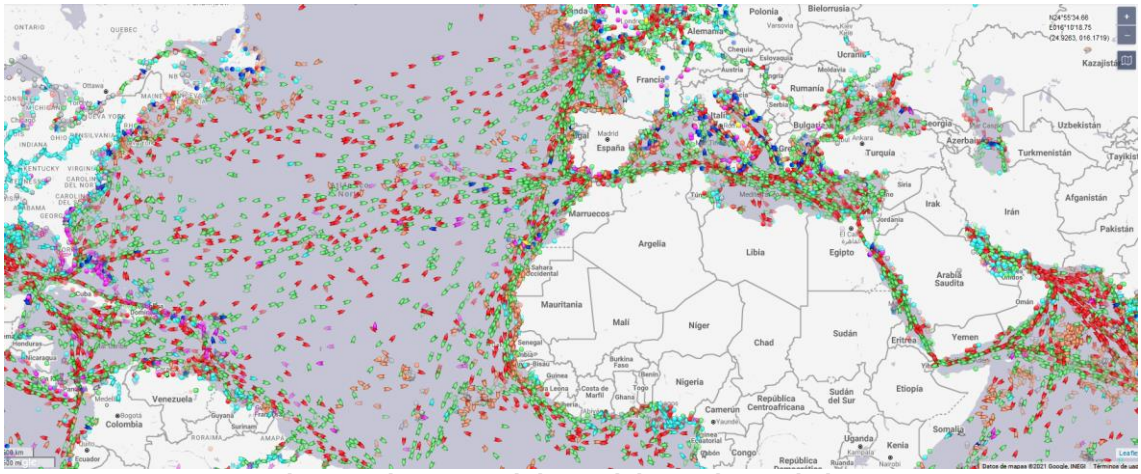
- Normativa y seguridad se cumplen en todas las fases de las que se compone una cadena logística.
- Consigue un control remoto de variables en un entorno de producción donde se requiere de una serie de ajustes y supervisión permanente. Menos mano de obra humana mejora los márgenes de error y permite mejorar la calidad de los productos.
- Las decisiones se pueden tomar en tiempo real y la visibilidad de la cadena de suministro mejora notablemente.
- Puede permitir también obtener información sobre el estado de todos los productos y en caso de haber una incidencia solventarla en tiempo récord. Esta ventaja resultaría especialmente útil en el caso del transporte de mercancía delicada.
- Mejora en los procesos de entrega con una mejor comunicación entre el operador que realiza el pedido y el cliente final. El cliente puede estar informado en todo momento sobre el estado de su pedido.
- Análisis exhaustivo de todo el proceso desde la fabricación del producto hasta la entrega final al cliente: Esta recogida de datos contribuirá a simplificar ciertas operaciones, reducir tiempos de inactividad, mayor control del inventario o ahorrar en espacio y sobre costes.

2.2.1 Perspectiva del Operador Logístico

Es evidente que la logística inteligente tiene un significado diferente para cada actor implicado. En el caso de las mercancías ferroviarias, cuando un operador logístico decide emplear este medio de transporte, piensa en su propio negocio, consistente en gestionar el transporte desde un punto hasta otro, ambos finales, independientemente del medio empleado.

Algo que puede echar para atrás a un operador logístico a la hora de seleccionar el tren como medio de transporte para las mercancías de sus clientes es el hecho actual de no poder hacer un seguimiento completo de las mercancías más que cuando entran y salen de determinado Hub o zona de intercambio en tierra. Sin embargo, no es capaz de saber exactamente dónde se encuentra el vagón que transporta su mercancía en todo momento o si sufre incidencias en tiempo real, de cara a prever una alternativa para sus clientes.

Sin embargo, para el transporte por carretera y barco, sí que existen soluciones de trazabilidad embarcadas, para poder saber en todo momento dónde se encuentra la mercancía. Por ejemplo, los sistemas de MarineTraffic [7] o Wtransnet [8], entre otros muchos, permiten monitorizar el seguimiento de los barcos y camiones, respectivamente, dedicados a transportar las mercancías de sus clientes. En la imagen siguiente se puede ver un ejemplo con una captura de pantalla del sistema MarineTraffic en un momento dado.



3 - Vista en tiempo real de posicionamiento de barcos

Para el Operador Logístico, la importancia de la tecnología es cada vez mayor y los negocios deben entender que o se aprovechan de la tecnología e invierten en logística inteligente o están acabados.

Hay que tener en cuenta que la innovación sólo es posible cuando se incorporan estas herramientas digitales que facilitan el trabajo y posibilitan un mejor servicio que redunda en un cambio de estructura o hacer las cosas.

Un claro ejemplo, como hemos visto en [6], es la implantación de sistemas de gestión de datos y otras soluciones informáticas acompañadas de medidas dispuestas a mejorar la ventaja competitiva sobre el resto de los operadores logísticos. Hay que tener en cuenta que en la logística existe un equilibrio de relaciones entre diferentes partes (clientes, proveedores, fabricación, entre otros) lo que hace imprescindible conectar todas las áreas y procesos para asegurar el flujo continuo y puntual de entrega de la mercancía.

De esta forma y gracias a la interconexión es posible hacer el seguimiento de los productos y crear inventarios inteligentes. El llamado Internet de las Cosas puede conectar sensores que se comunican con programas informáticos y dan una valiosa información sobre las cantidades, calidades y el stock de los productos, como se puede ver en los productos y proyectos de esta empresa [42].

Responder a la pregunta qué es la logística inteligente no sólo implica usar tendencias logísticas como el cloud computing, el blockchain (véase el proyecto de *Smart Contract* de [45]) o la inteligencia artificial sino combinar la tecnología con técnicas como el platooning [43] o el cross-docking [44] que mejoran aspectos la reducción de combustible, la conducción eficiente o el ahorro en el tiempo de almacenamiento.

Dado que el proceso de entrega es importante para sus clientes, el objetivo de un operador logístico que implemente procesos inteligentes es conseguir afianzar la confianza de la relación entre ellos mediante la entrega a tiempo en cantidad y calidad establecidas. El futuro logístico es el de las empresas que sean eficaces, responsables, sostenibles y por supuesto, tecnológicas.

Por ejemplo, si se trata de operadores dedicados al transporte de mercancías perecederas se debe respetar la cadena de frío y habría que implantar medidas que mejoren y aseguren la cadena de frío como la colocación de termógrafos, sensores de temperatura, sensores de estiba y soluciones similares. En cambio, de poco vale colocar un sistema gestión de datos si sólo se cuenta con una flota de cinco camiones.

Es por ello por lo que los operadores logísticos principales, como DHL, FCC… [46], buscan socios que se adecúen a esta manera de entender el negocio. Dadas las características del ferrocarril de mercancías en España, tratado como monopolio hasta hace muy poco, no siempre es posible, dado que la información no se suele compartir.

2.2.2 Perspectiva del Operador Ferroviario

Debemos entender aquí como operador ferroviario a aquella empresa del sector del transporte con capacidad operativa para realizar transporte ferroviario, normalmente sin consideración de la carga específica que transporta. Todo ello a pesar de que, hoy en día, empresas tan reconocibles como Renfe Mercancías está tratando de convertirse en un operador híbrido (logístico-ferroviario), al estilo de Deutsche Bahn.

Por una parte, sabemos que el transporte de mercancías o carga por ferrocarril puede ser la mejor opción en las siguientes situaciones:

- Cuando se realiza un transporte desde un puerto marítimo.
- Para transportar mercancías a granel.
- Cuando busca un envío rápido a larga distancia (el transporte aéreo es más rápido, pero no es posible transportar cargas tan grandes).
- Si se transportan materias primas sin procesar o materiales como metales o carbón.
- Cuando se busca una alternativa más respetuosa con el medio ambiente, en especial comparada con el transporte aéreo.

Por otra parte, el precio de transportar carga en tren de mercancías depende de los siguientes factores:

- Dimensiones de la carga: Tamaño, volumen y peso de la carga
- Distancia: El transporte ferroviario sale más rentable para transportar carga a larga distancia
- Direcciones de recogida y destino: Se requiere otro servicio de transporte para conectar la estación de ferrocarril con las direcciones de recogida y entrega
- Tipo de carga: El precio de transporte ferroviario se determina por el tipo de artículos enviados

- Seguro: Puede contratar un seguro adicional para una protección adicional de la carga
- Despacho de aduanas: En caso de transporte ferroviario internacional es posible que haya que pagar las tasas aduaneras.

En sentido estricto, el operador ferroviario toma los contenedores o graneles, los carga en los vagones en los puntos concertados, especialmente en los puertos, y se encarga del transporte entre grandes centros logísticos ferroviarios.

Si bien, algunos operadores ferroviarios han empezado a dar servicios de operador logístico integral, como Renfe Mercancías.

En todo momento, el operador ferroviario sabe en qué tren se han metido los contenedores, siendo partícipe y conocedor del enganche y desenganche, de la bajada y subida de los contenedores. En definitiva, de la transferencia de mercancías entre tren y tierra, así como la recepción de camiones y la clasificación según destino. En la siguiente figura se puede ver una terminal ferroviaria de mercancías sonde se realiza la clasificación e intercambio de modo de transporte.

4 - Madrid Abroñigal [9]

En cuanto a lo que concierne a este trabajo, sabemos que en Renfe Mercancías han instalado un centro de gestión de operaciones pionero en España, en funcionamiento desde finales de 2018 con sede central de Madrid. Este centro está dotado de la más avanzada tecnología digital [47] para el control de las operaciones que realizan todos los trenes que gestionan. Desde el centro de control realizan un seguimiento en tiempo real de todos los elementos que intervienen en el proceso productivo y comercial, desde el momento en que se programa la circulación de un tren hasta que llega a su destino.

En ese sentido, se han puesto en marcha dos acciones fundamentales. Por una parte, se ha dotado de ‘tablets’ a los maquinistas lo que va a redundar en la agilización de las operaciones en terminales, permitirá la descarga del documento del tren que contiene todo el detalle comercial y técnico de cada vagón, comunicar el tren dispuesto al gestor de la infraestructura y mejorar los tiempos de respuesta.

Al mismo tiempo, se está dotando a las terminales de Smartphone para el control de las actividades de gestión de cada tren, lo que permitirá disponer de información sobre operaciones que se realicen, facilitará información en tiempo real sobre posicionamiento de vagones y permitirá también comunicar el tren dispuesto además de proporcionar información para el control económico del coste de terminales.

Es importante destacar que la tecnología empleada se basa en el sistema Copérnico. A través de Copérnico se realiza un seguimiento en tiempo real del recorrido completo de cada tren, basado en tecnología GPS, a disposición de los clientes [10].

Esto, supone una ineficiencia importante, ya que, como veremos, el Administrador de Infraestructuras es el que debe saber en todo momento en qué punto exacto se encuentra el tren. Si bien, se entiende la medida adoptada, similar a la que se emplea en las flotas de camiones para el transporte por carretera, ya que actualmente, el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias no tiene en todas sus líneas de mercancías un sistema de comunicación continuo.

Por otra parte, cabe destacar que el sistema GPS permite conocer la ubicación del tren, pero por ahora, no está pensado para transmitir otras variables asociadas al estado de las Mercancías entre el tren y tierra, como la temperatura o las condiciones higrométricas de la carga, por ejemplo.

2.2.3 Perspectiva del Administrador de Infraestructuras

El último actor principal, además del cliente final, obviamente, que forma parte de la cadena logística para el transporte de mercancías ferroviarias es el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias. Éste se encarga de permitir y optimizar el tráfico de los trenes por las vías de la RFIG o de la red que se le haya adjudicado.

En las grandes terminales de contenedores que dirige, el administrador toma los contenedores o graneles, los carga en los vagones en los puntos concertados, especialmente en los puertos, y se encarga del transporte entre grandes centros logísticos ferroviarios.

De acuerdo con la legislación vigente, la prestación de los servicios adicionales en la RFIG y sus zonas de servicio ferroviario será realizada siempre por el ADIF, estando obligado a prestarlos a solicitud de las empresas ferroviarias.

En cuanto a los Modelos de Gestión existentes, la actual legislación establece para las Terminales de Transporte de Mercancías de ADIF los siguientes [11]:

- Gestión Directa, que consiste en la prestación de los Servicios Complementarios y Auxiliares por Adif, bien con recursos propios o a través del establecimiento de contratos de servicios específicos

- Gestión a Riesgo y Ventura, que consiste en la gestión de la prestación de los servicios Complementarios o Auxiliares por otros explotadores, públicos o privados, que cuenten con el contrato de disponibilidad de espacios y recursos, a su riesgo y ventura
- Gestión en Autoprestación, que consiste en la prestación de servicios Auxiliares por las Empresas Ferroviarias, para sí mismas o en régimen de colaboración con otras Empresas Ferroviarias, en régimen de no exclusividad

Los Operadores Ferroviarios tienen derecho a recibir de modo no discriminatorio los servicios básicos mínimos de acceso a la infraestructura de ADIF (logística), incluido el acceso por vía férrea a las instalaciones y a los servicios que se prestan en ellas.

Los servicios que puede prestar el ADIF en su ámbito competencial son los siguientes:

- Servicios Básicos Mínimos de Acceso
- Servicios Complementarios
- Servicios Auxiliares

En las Terminales de Transporte de Mercancías, ADIF, a través de su área de Servicios Logísticos presta los servicios conforme a lo establecido en la Ley 38/2015, de 29 de septiembre del Sector Ferroviario, y según el modelo de Gestión de cada Terminal.

Ofrece, entre otros, el servicio de “Manipulación de Unidades de Transporte Intermodal”, en las terminales que gestiona directamente su prestación y puede además ofertar los Servicios Auxiliares de:

- Operaciones sobre el material asociadas al acceso o expedición de trenes.
- Operaciones de acceso a instalaciones exteriores sin vehículo de maniobras
- Maniobras de posicionamiento en las Terminales de Transporte de Mercancías
- Operaciones de acceso a instalaciones exteriores con vehículo de maniobras
- Maniobras de entrega y/o recogida en otras instalaciones.
- Maniobras en instalaciones sin vehículo de maniobras
- Maniobras de formación/selección, sin vehículo de maniobras
- Maniobras en instalaciones con vehículo de maniobras
- Maniobras de formación/selección, con vehículo de maniobras.

Sin embargo, lo que más nos interesa para este trabajo es que también se encarga de lo siguiente en la RFIG:

- De construir y mantener la infraestructura necesaria para mantener la seguridad y funciones propias del transporte ferroviario.

- La gestión de la circulación de los trenes en la red.

Al respecto, en todos los administradores ferroviarios se cuenta con el sistema CTC [12] para controlar la circulación ferroviaria. Éste consiste en la regulación de todas las señales y agujas situadas en el trayecto desde un punto único y mediante sistemas informáticos, lo que permite establecer la ruta de los diferentes trenes con las mayores garantías de seguridad y fiabilidad. Las operaciones se realizan mediante un sistema de retroproyectores que reproducen la topografía de las vías y visualizan los diferentes trenes en circulación y una serie de ordenadores que dictan y ejecutan las órdenes. La utilización de sofisticados sistemas informáticos que controlan los elementos de la infraestructura e impiden la ejecución de órdenes contradictorias y que, al mismo tiempo, visualizan en cada momento la situación de los trenes, aumenta considerablemente las condiciones de seguridad de la explotación ferroviaria.

Los centros de Control de Tráfico Centralizado están previamente programados para cada itinerario, de manera que automáticamente se ajustan las agujas y señales al paso del tren. La simple pulsación de un botón permite el cambio de agujas, que se mueve por impulsos eléctricos.

Los sistemas están diseñados de forma que, aunque se produjera un error humano se garantizaría la seguridad, una vez que el tren está en un tramo de vía, el ordenador no ejerce ninguna orden contradictoria.

La efectividad del CTC se completa con la duplicación de todos los elementos vitales del puesto de mando. Así, se evita que un fallo pueda afectar al sistema.

Este sistema permite la gestión del tráfico ferroviario desde un puesto de control (puesto de mando) donde se accionan las señales y los cambios automáticos de vía, que ordenan los movimientos de los trenes. El CTC implica la instalación de sistemas de enclavamientos en las estaciones, tendido de cables de comunicaciones, telemando, señalización, sistema de comunicación Tren-Tierra y obras complementarias de instalación de equipamientos.

ADIF gestiona más de 8.100 kilómetros de red convencional regulados por Control de Tráfico Centralizado. La implantación paulatina de este sistema redunda en una mayor fiabilidad y seguridad en la gestión de la circulación ferroviaria de la red convencional. Toda la red de alta velocidad está dotada de CTC.

En la siguiente imagen se puede ver la perspectiva desde un puesto de operador de circulación ferroviaria, con la información necesaria para el cumplimiento de la seguridad y el horario asignado a cada tren.

5 - CTC y Malla Ferroviaria

En los CTC, se puede hacer un seguimiento de la previsión horaria de los trenes a su paso por las estaciones de una línea, para comprobar que se cumple el horario, dado que lo que el ADIF vende son surcos horarios. Esto es, la posibilidad de que un tren circule a determinada hora por determinado tramo entre estaciones.

Se puede ver sucintamente en la malla ferroviaria de la imagen, si bien, se detallará en capítulos posteriores.

Sin embargo, hay que tener en cuenta un detalle, que es el que nos acerca a este trabajo que presentamos ahora. En el RCF [13] se indica lo siguiente:

"Los administradores de infraestructuras, con excepción de los Puertos, deberán realizar un Estudio-Diagnóstico de las Comunicaciones en su red, con identificación de aquellos tramos significativos de sus líneas donde no se disponga de medios de comunicación propios (radiotelefonía u otros). Incluirá además información sobre la disponibilidad o no de cobertura a través de la red de radiotelefonía pública. Dicho Estudio deberá ser presentado a la AESF antes del 15 de septiembre de 2018.A partir de dicho Estudio elaborarán un Plan de Mejora de las Comunicaciones entre cualquier punto de sus líneas y los centros de regulación de tráfico correspondientes. Este Plan deberá ser presentado a la AESF antes del 15 de septiembre de 2019."

Obviamente, esto no incluye las líneas que no forman parte de la RFIG, como las abandonadas. Por tanto, el ADIF no tiene previsto equipáralas en este Plan. **Deberá instalar radiotelefonía si las quiere recuperar** para el servicio.

Aprovecharemos este TFM para simular la recuperación de una línea abandonada con dos finalidades, hacer cumplir el RCF anterior y abrir la puerta

a que los operadores ferroviarios usen el preceptivo sistema de radiocomunicaciones para enviar los datos que sus clientes (operadores logísticos) les soliciten sobre la mercancía de forma continuada, en tiempo real. Esto puede simplemente ir desde la posición del tren sin recurrir a otros medios externos, hasta la transmisión de todas las variables de estado de la mercancía, especialmente las destinadas a garantizar la trazabilidad de la misma (temperatura, humedad, vibraciones…).

2.3 Mercancías Ferroviarias

Hasta aquí hemos podido intuir la problemática existente con el transporte ferroviario de mercancías, que no parece estar enlazado con el avance en logística de los últimos años. Fruto de lo cual, han ido surgiendo, como hemos visto, iniciativas aisladas destinadas a realizar el seguimiento de los trenes para paliar el déficit tecnológico de la infraestructura.

También hemos visto cómo hay muchas líneas ferroviarias abandonadas o que se encuentran obsoletas, lo cual nos empuja a intuir la necesidad técnica de equipar con radiocomunicaciones las líneas ferroviarias (especialmente estas últimas porque las nuevas ya disponen de ello). Sin embargo, no ha quedado aún claro por qué hacerlo solamente para mercancías y no para viajeros también (o mixtas). Y más aún, cómo enlazar esto con la Smart Mobility de la que hablábamos al principio.

Vamos a entrar en ciertos detalles (aparentemente inconexos) referentes al transporte de mercancías ferroviarias que nos darán la perspectiva necesaria para poder entender la motivación de los objetivos.

2.3.1 Directrices de la Unión Europea.

El 15 de diciembre de 2020, la Comisión Europea ha dado a conocer su Estrategia para una Movilidad Sostenible [48] con unos objetivos de movilidad cero emisiones, en todos los modos de transporte, con un horizonte en 2050, cuando se habrán reducido en un 90% las emisiones.

El transporte de mercancías o pasajeros por carretera, el transporte particular, ferroviario, marítimo y aéreo, todos los modos de transporte deberían estar en un umbral de cero emisiones en 2050, según plantea la Estrategia para una Movilidad Sostenible de la Comisión Europea en donde incluye 82 iniciativas que deben ponerse en marcha en los próximos cuatro años para conseguir una disminución de un 90% de las emisiones actuales, gracias a un “sistema de transporte inteligente, competitivo, seguro, accesible y asequible”.

En cuanto al transporte de mercancías, una parte sustancial del 75% de la carga interior que se transporta hoy en día por carretera debería pasar al ferrocarril y a las vías navegables interiores. Esto será posible gracias al aumento de la capacidad, el fortalecimiento de la coordinación y la cooperación transfronterizas entre los administradores de la infraestructura ferroviaria, una

mejor gestión general de la red ferroviaria y el despliegue de nuevas tecnologías, como el acoplamiento digital y la automatización.

Las cifras que se manejan en la Comisión Europea para el ferrocarril de mercancías son ambiciosas, dado que estima que el tráfico de mercancías por ferrocarril aumentará un 50% para 2030 y se duplicará para 2050, indicando además que ya en 2030, “el transporte intermodal por ferrocarril y por vía navegable podrá competir en igualdad de condiciones con el transporte por carretera en la UE”. Esta estrategia de movilidad a escala europea sienta las bases para que el sistema de transporte de la UE pueda conseguir su transformación ecológica y digital y sea más resiliente ante futuras crisis.

La crisis de Covid-19 ha puesto de manifiesto que el tren facilita el suministro de mercancías esenciales, como alimentos, medicinas y combustible, especialmente en circunstancias excepcionales [14].

Según el Pacto Verde Europeo [15], el resultado será, si se cumplen los planes fijados, una reducción del 90% de las emisiones de aquí a 2050.

Para 2050 todos los modos de transporte tienen que ser sostenibles y disponer de alternativas ecológicas que, junto con unos incentivos adecuados, deben dar como resultado esta transformación de la movilidad. Para ello, el planteamiento es que las emisiones de los medios de transporte deben ser cero, pero no plantea si el combustible utilizado para producir la electricidad o el hidrógeno que impulsará esos modos de transporte también va a ser cero emisiones o no. Es decir, penaliza a los vehículos, pero no a la producción del combustible alternativo.

La Comisión Europea propuso el 4 de marzo de 2020 que 2021 sea el Año Europeo del Ferrocarril para contribuir a la consecución de los objetivos del Pacto Verde Europeo en el ámbito del transporte. Será el primer año completo en el que se apliquen en toda la Unión las normas acordadas en el marco del Cuarto Paquete Ferroviario.

El 14 de diciembre de 2016, el Parlamento Europeo aprobó este Cuarto Paquete Ferroviario, el marco de una reforma ferroviaria para mejorar la eficiencia y la competitividad del ferrocarril en toda la Unión Europea y, al mismo tiempo, eliminar los actuales obstáculos institucionales, jurídicos y técnicos, creando una red ferroviaria europea plenamente integrada y liberalizada.

La liberalización contemplada en el 4º paquete ferroviario ya ha sido transpuesta a la legislación española. En concreto, el Real Decreto-ley 23/2018, del Sector Ferroviario, que marcó el mes de diciembre de 2020 como fecha de inicio para la entrada de nuevas empresas ferroviarias en el transporte de viajeros por ferrocarril en los servicios de larga distancia y alta velocidad.

A partir de dicha fecha, cualquier empresa que disponga de la licencia de empresa ferroviaria y del certificado de seguridad, que otorga la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria, y haya solicitado el uso de la infraestructura

ferroviaria, podrá prestar servicios en competencia con Renfe, monopolio hasta entonces.

El mercado de transporte ferroviario de mercancías inició su liberalización en España en 2005, si bien no se produjo la entrada efectiva de otras empresas ferroviarias privadas hasta 2007. Actualmente, el sector opera en régimen de libre competencia.

Pero para las mercancías ferroviarias no todo han sido facilidades a pesar del impulso que se ha hecho desde Europa. Un informe especial elaborado en 2016 por el Tribunal de Cuentas Europeo [16] indica que los resultados del transporte de mercancías por ferrocarril en la UE siguen siendo, por lo general, insatisfactorios, y la posición del transporte por carretera se ha venido reforzando desde 2000.

Pese a los objetivos de las políticas de la UE establecidos por la Comisión de transferir el transporte de mercancías de la carretera al ferrocarril y a los fondos facilitados por la UE para financiar la infraestructura ferroviaria, los resultados del transporte de mercancías por ferrocarril en la UE son insatisfactorios en cuanto al volumen transportado y a la cuota modal. De hecho, la cuota modal media del transporte de mercancías por ferrocarril en la UE ha sufrido un ligero descenso desde 2011.

Además de los mediocres resultados del transporte de mercancías por ferrocarril en cuanto al volumen y a la cuota modal, la velocidad comercial media de los trenes de mercancías en la UE es muy baja (unos 18 km/h en muchas rutas internacionales), debido a la escasa cooperación entre los administradores de infraestructuras nacionales. El Tribunal no halló evidencia de que se hubiera registrado un aumento significativo en los últimos diez años. Sin embargo, en los corredores ferroviarios de mercancías, la velocidad media de los trenes es relativamente similar a la de los camiones.

En los últimos quince años, el transporte de mercancías por ferrocarril no ha respondido de manera eficaz ante la competencia del transporte por carretera en la UE. Los expedidores prefieren claramente la carretera al ferrocarril para el transporte de mercancías.

El Tribunal formula una serie de recomendaciones centradas en dos cuestiones principales: en primer lugar, las mejoras necesarias en el marco estratégico y normativo que rige el transporte de mercancías por ferrocarril. Con este objetivo, la Comisión, junto con los Estados miembros, debería resolver las insuficiencias observadas en la liberalización del mercado del transporte de mercancías por ferrocarril, en los procedimientos de gestión del tráfico, en las limitaciones administrativas y técnicas, en el seguimiento y la transparencia de los resultados en el sector y en unas condiciones de competencia equitativas para los distintos modos de transporte.

En segundo lugar, el Tribunal recomienda que se haga un mejor uso de los fondos europeos disponibles y se destinen a las necesidades del sector del transporte de mercancías por ferrocarril. Con este fin, la Comisión y los

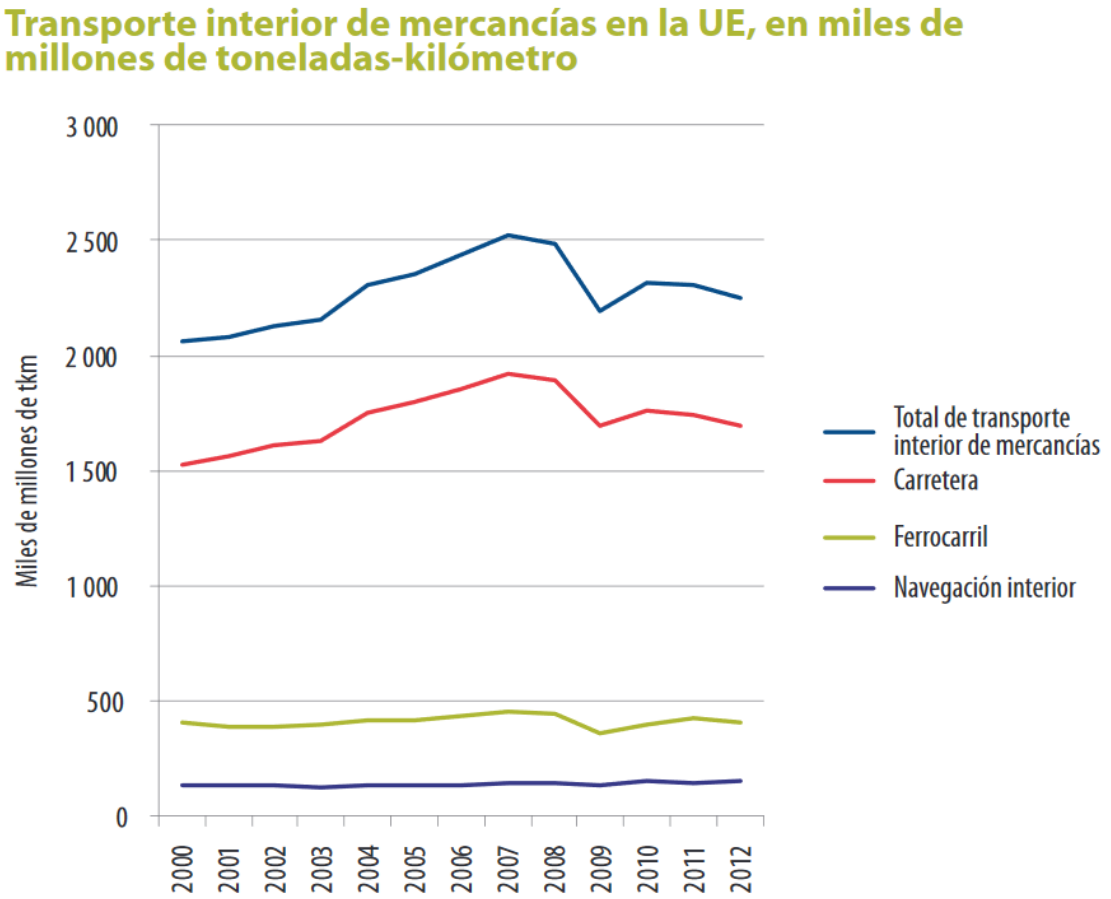
Estados miembros tendrían que lograr mejorar en los siguientes ámbitos: coherencia entre los objetivos de las políticas y la asignación de fondos (especialmente en los corredores de transporte de mercancías por ferrocarril), selección, planificación y gestión de proyectos y mantenimiento de la red ferroviaria.

En la siguiente imagen podemos identificar claramente los actores que hemos ido desgranando a lo largo del texto hasta aquí. Vemos que el Operador Logístico corresponde a las partes 1, 2 y 6 de la figura, el Operador Ferroviario corresponde al número 3 y el Administrador de la Infraestructura al 4. Bien es cierto que hay otro interviniente, en este caso regulador, correspondiente a la casilla 5, al que únicamente le hemos dedicado las últimas líneas, identificándolo con las decisiones provenientes de la Unión Europea.

Fuente: Tribunal de Cuentas Europeo.

6 - Actores del transporte de mercancías ferroviarias

Como se puede apreciar en la siguiente gráfica del Tribunal de Cuentas Europeo [16], pese a los esfuerzos desplegados por la Comisión desde el Libro Blanco de 2001, los resultados del transporte de mercancías por ferrocarril en la UE siguen siendo en general insatisfactorios. Los volúmenes de mercancías transportadas anualmente por ferrocarril se mantuvieron relativamente estables entre 2000 y 2012 (unos 400 000 millones de toneladas-kilómetro). En el mismo período, los volúmenes de mercancías transportadas por carretera aumentaron (de 1 522 000 millones a 1 693 000 millones de toneladas-kilómetro), como se muestra en el gráfico siguiente.



Fuente: Tribunal de Cuentas Europeo, a partir de los últimos datos disponibles de Eurostat.

7 - Reparto de transporte de mercancías en la UE

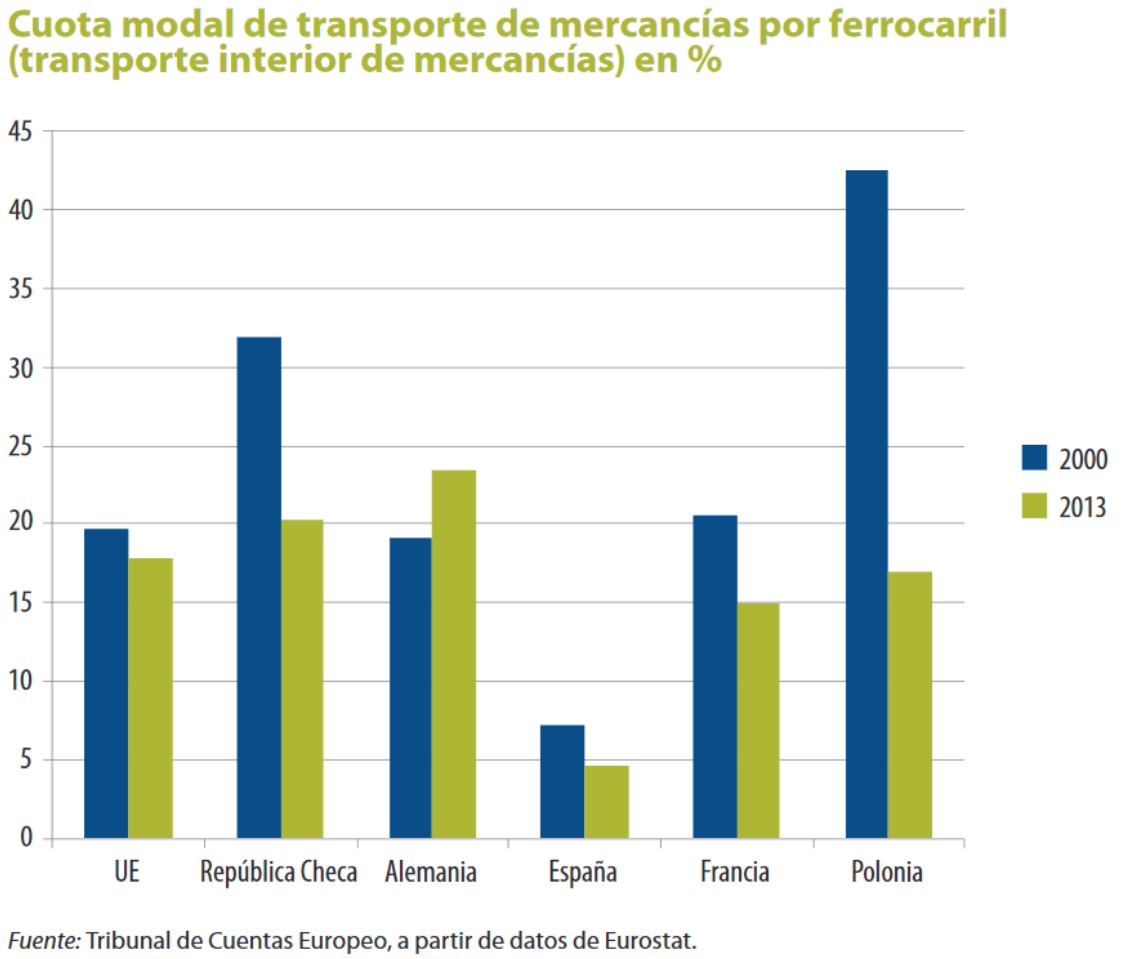
La velocidad comercial media de los trenes de mercancías no contribuye a remediar los mediocres resultados obtenidos por el transporte de mercancías por ferrocarril en cuanto a volumen y cuota modal.

Una vez que se han adjudicado los surcos a los operadores ferroviarios y que los trenes circulan por la red, el administrador de infraestructuras se encarga de gestionar el tráfico. Todos los días hay que reprogramar o detener trenes como consecuencia de las perturbaciones en la red, los trabajos de mantenimiento en determinadas líneas, los retrasos de otros trenes, etc. En estos casos, los administradores de infraestructuras otorgan prioridad al tráfico de viajeros, lo que ocasiona retrasos significativos en los trenes de mercancías, independientemente de la naturaleza de su carga y de las causas del retraso.

Las limitaciones también afectan a aspectos técnicos de las operaciones de los trenes que dificultan la interoperabilidad. Entre otros, en los sistemas de señalización, que son diferentes en cada país. Cualquier locomotora que entre en un país debe estar equipada con el sistema de señalización nacional, lo cual significa que las locomotoras que cruzan una frontera deben contar al menos con dos o tres sistemas de señalización instalados a bordo. La Comisión, en estrecha cooperación los Estados miembros y otras partes interesadas en el ferrocarril está desarrollando y aplicando un sistema de señalización europeo,

el ERTMS, destinado a reemplazar los sistemas de señalización nacionales. Sin embargo, la aplicación del ERTMS es lenta y se resiente de problemas de interoperabilidad

Esto se puede ver especialmente en España, donde el proceso de liberalización ha sido lento. Como se puede ver en la siguiente gráfica obtenida de [16], la comparativa con otros países no sale muy bien parada para las mercancías ferroviarias españolas.



Fuente: Tribunal de Cuentas Europeo, a partir de datos de Eurostat.

8 - Reparto del tráfico de mercancías por país en la UE

Para ver esto simplemente basta indicar que el tramo ferroviario internacional entre Perpiñán y Figueras está gestionado por un concesionario privado responsable de establecer los cánones de acceso para trenes. El coste total de la construcción de esta nueva línea asciende a 1.100 millones de euros, de los cuales, 162 millones de euros son aportados por fondos de la UE. En este tramo ferroviario, el coste de acceso a la infraestructura es seis veces superior para un tren que para un número equivalente de camiones que se desplazara entre los dos mismos puntos por autopista.

2.3.2 Tecnologías disponibles y en estudio para el transporte de mercancías a través del ferrocarril.

Existen varias formas de transporte de mercancías por ferrocarril: vagón completo (el cliente desea transportar unos cuantos vagones y el tren se compone de vagones de diferentes clientes), tren completo (el cliente tiene mercancías suficientes para llenar un tren), y transporte intermodal o combinado ferrocarril-carretera (el contenedor o remolque se carga en el vagón).

Sobre los dos primeros, dejamos simplemente una referencia bibliográfica para que el lector interesado pueda enriquecer la lectura [17], especialmente el capítulo 4.

En este trabajo, nos centraremos en explicar el transporte intermodal, dado que, como hemos visto, el Pacto Verde Europeo induce a pensar que habrá una transferencia de mercancías de la carretera al ferrocarril.

En Europa, su expansión está ligada a la de la UIRR, que se ha configurado como la UIC del transporte intermodal. A finales de 1960 nació este tipo de transporte intermodal, cuando una serie de empresas ferroviarias se asociaron para realizar transportes combinando la carretera y el ferrocarril, realizando acarreos cortos por carretera en rigen y destino hasta o desde terminales ferroviarias y el trayecto de largo recorrido, en tren de mercancías. Este sistema se importó de EEUU, donde los semirremolques se cargaban sobre vagones plataforma. En Europa, por los problemas de gálibo, especialmente en túneles, se han ido generando diferentes soluciones desde entonces.

La UIRR estableció una clasificación para describir las distintas técnicas existentes:

- Transporte de contenedores, cajas móviles y semirremolques (combinado no acompañado)
- Transporte de vehículos completos (combinado acompañado o carretera rodante)

En el segundo caso, el conductor del vehículo de carretera acompaña al mismo en su recorrido por ferrocarril.

Orientando la descripción hacia lo que nos interesa más en este caso, para el transporte de semirremolques hay diferentes técnicas, como veremos a continuación. Hablamos de semirremolques completos, es decir, con el bastidor y el tren de rodaje. Lo estudiamos aquí, porque resulta especialmente interesante para las empresas de transporte por carretera, que disponen de su parque propio y desean evitar los remolques de larga distancia dentro del ámbito europeo, asegurando además que la mercancía no sufre rupturas de carga ni manipulaciones intermedias.

Los acarreos inicial y final se realizan por carretera, pero es el propio semirremolque el que viaja en el tren hasta la terminal intermodal más próxima

a su destino. En la siguiente fotografía podemos ver uno de los semirremolques mencionados.

9 - Semirremolque de KRONE

Para obtener un funcionamiento ágil, la empresa operadora de carretera que expide una carga debe contar con corresponsales en la terminal de destino que aseguren el acarreo final.

Hay diferentes técnicas para este tipo de transporte:

- El vagón poche

Consiste en un vagón plataforma, con un aparte en forma de cuna rebajada a la mínima altura posible sobre el carril, donde se alojan las ruedas del semirremolque de carretera. De hecho, recientemente, en marzo de 2021, ADIF ha sacado a consulta la NAG 5-1-0.0 ‘Gálibos de autopista ferroviaria: Vagón Poche’ con el objeto de definir los diferentes gálibos de autopista ferroviaria tanto para ancho ibérico como estándar [18], lo que se entiende como una declaración de intenciones de hacia dónde va el transporte de mercancías ferroviarias por parte del Administrador de Infraestructuras español.

10 – Reproducción a escala de vagón poche de ÖBB

- El sistema Modalohr

Modalohr es un tipo de vagón que permite el transporte de remolques y camiones sobre la red ferroviaria existente desarrollado y fabricado por la empresa francesa Modalohr, filial de Lohr [19].

La caja del vagón gira unos 30° para cargar los camiones completos o remolques -según los casos-, y la carga puede ser efectuada directamente con la cabeza tractora (sin necesidad de grúas u otro equipo). Al ser la entrada lateral, en batería, es posible la carga simultánea y rápida de los camiones. Los bogies y ruedas son estándar (en contraste con los vagones utilizados en las autopistas ferroviarias alpinas en Suiza, que tienen ruedas pequeñas), lo que presenta ventajas del punto de vista de seguridad y costos de mantenimiento.

El vagón de piso bajo Modalohr permite cargar la mayoría de camiones estándar sin modificaciones:

- Altura máxima sobre carretera: 4,04 m
- Peso máximo del semirremolque: 38 t
- Longitud máxima del semirremolque: 13,7 m

Este tipo de vagón es utilizado en la Autopista ferroviaria Perpiñán-Luxemburgo (1060 km) y en la autopista ferroviaria del túnel del Fréjus, entre Aiton, en Saboya, y Obrassano, en Italia (170 km).

11 - Sistema Modalohr en uso

- <u>El sistema Megaswing</u>

Con posterioridad al sistema Modalohr, y debido a los altos costes de las instalaciones fijas, han aparecido otros cuyo denominador común es que el abatimiento de la caja del vagón, a 45º respecto a la vía, para permitir la carga y descarga de los semirremolques, se ejecuta mediante dispositivos hidráulicos embarcados en el mismo. Esto incrementa el coste de los vagones, pero flexibiliza su uso totalmente, ya que no los hace depender de terminales determinadas.

La empresa sueca Kockums Industrier ha desarrollado un tipo de vagón como alternativa al sistema Modalohr. La originalidad consiste en que permite con

medios propios cargar y descargar semirremolques ordinarios no adaptados en principio. Este vagón ya ha sido homologado para su circulación por la TEN-T y podría ser una alternativa real para captar tráfico de la carretera al ferrocarril.

12 - Sistema Megaswing en uso

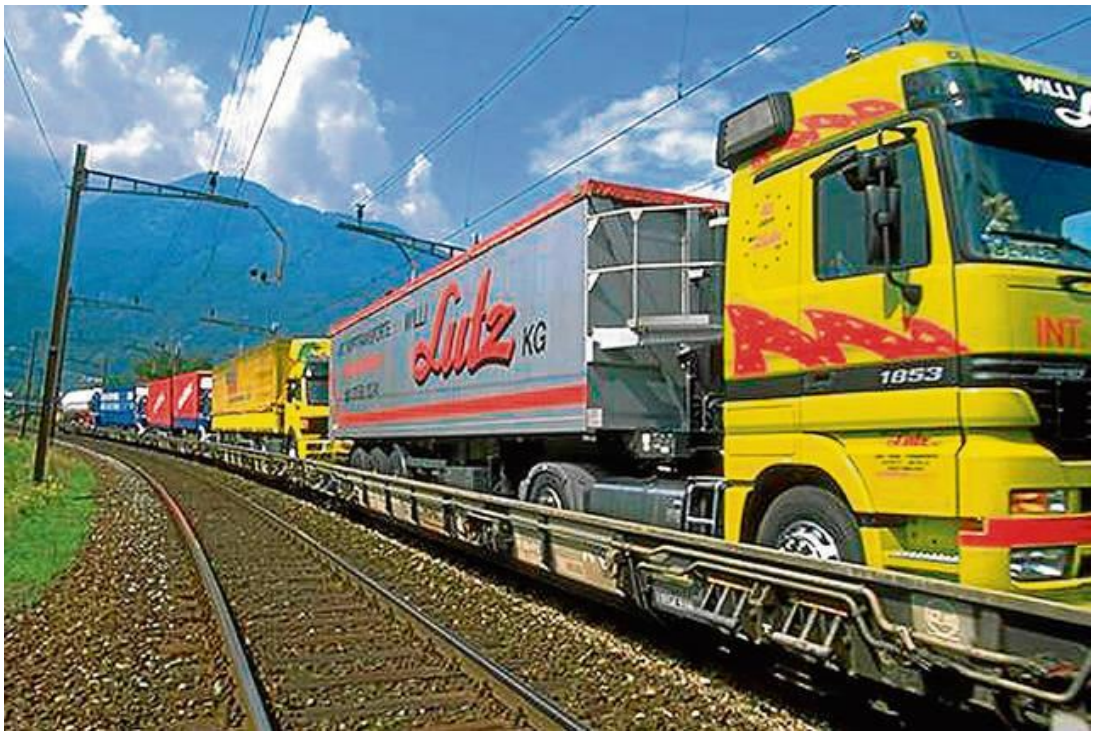
Como inconveniente principal, se encuentra el coste, ya que es el doble que un vagón poche clásico, sin dispositivos adicionales, que está en torno a los 90.000€. El futuro de esta solución pasa por obtener unos precios atractivos para las empresas operadoras de transporte por carretera, sin subveniones por parte de ninguna administración, lo que permitiría competir con Modalhor, que sí tiene subvención para sus infraestructuras y por eso ofrece precios competitivos.

- La carretera rodante

También conocida como autopista ferroviaria. Se trata de una tecnología desarrollada sobre todo por Suiza y Austria, que permite la travesía de macizos montañosos. Accidentes naturales o estrechos marítimos, zonas especialmente sensibles a las externalidades del transporte terrestre, o pasos fronterizos delicados por motivos de congestión o de discontinuidad en las infraestructuras de carretera. Consiste en cargar los camiones con su cabeza tractora sobre vagones diseñados especialmente para este fin y disponer coches de viajeros en el convoy para los conductores.

El interés de este producto consiste en posicionarse entre el transporte combinado clásico y el transporte por carretera. Desde la óptica de la economía del transporte, se ha considerado como un sistema ineficaz, ya que, junto al peso neto de las mercancías transportadas, hay que transportar una

considerable cantidad de peso muerto, el semirremolque con su tractora, además de la propia tara del vagón.



13 - Ejemplo de carretera rodante

Sin embargo, el interés reside en que no se precisan inversiones para adaptar los vehículos de carretera, por lo que es apto para la ingente cantidad de transportistas autónomos que no disponen de capacidad de adaptación a tecnologías especiales. También ofrece la ventaja de computar el tiempo de recorrido ferroviario como tiempo de reposo para el conductor.

España y Francia pusieron en marcha en 2017 el proceso para articular autopistas ferroviarias entre ambos países, rutas para que los camiones de transporte de mercancía crucen los Pirineos subidos a bordo de trenes, informó el Ministerio de Fomento [20]. La iniciativa se enmarca también en la estrategia de España de impulsar el tráfico ferroviario de mercancías, dado que, pese a la liberalización del sector en 2005, el tren apenas transporta el 5% de la carga que se mueve por España.

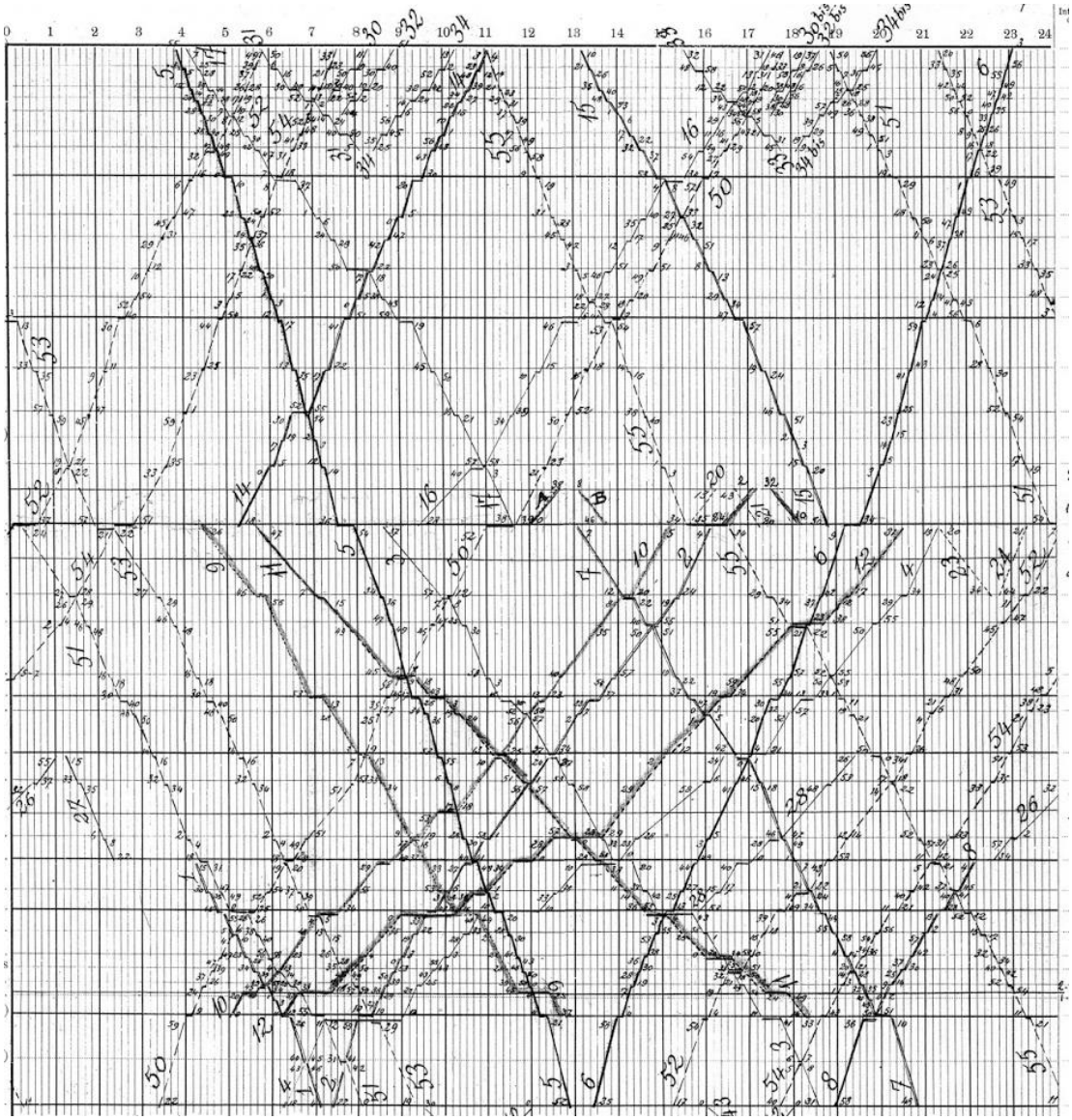
Por otra parte, para el objetivo que nos atañe, esta modalidad no presenta gran interés, ya que las cabezas tractoras disponen actualmente de tecnología para hacer el seguimiento por carretera, por lo que no es importante ofrecer una alternativa tecnológica para el tracking continuo de la mercancía.

2.3.3 Efecto de supresión en la Circulación.

Una de las preguntas que cabe preguntarse es por qué no se puede extender la renovación de las vías también para el tráfico de pasajeros. Por qué para uso exclusivo de mercancías.

El primer motivo es que su abandono se debió a su escasa rentabilidad, a que pasa por puebles con poca demanda de viajeros, por lo que, si la población no ha aumentado (más bien al contrario: éxodo rural), es improbable que lo haya hecho la demanda.

El segundo motivo reside principalmente en el efecto de supresión. Se explica muy bien el funcionamiento de una malla y los surcos horarios en la referencia aportada [21]. No se pretende detallarlo aquí, sino ver su aplicación práctica para el caso que nos ocupa. En la siguiente gráfica podemos ver un ejemplo de una malla ferroviaria, como la explicada en la referencia, con el efecto de supresión.



14 - Ejemplo de malla ferroviaria con tráfico mixto

Lo que sucede es que, cuando se insertan trenes con diferente velocidad comercial en una misma línea, hay que prever lo siguiente:

- Puntos de adelantamiento, lo cual supone la construcción adicional de una infraestructura costosa.
- Menor aprovechamiento de la línea: cada tren de pasajeros, por su mayor velocidad, hace que, si se intercala entre los trenes de mercancías, los surcos deban ser más anchos, ya que requiere una mayor distancia libre por delante.

Si queremos que la línea sea una alternativa real al transporte por carretera (y potencialmente rentable, en consecuencia), se debería ofrecer una gran frecuencia de paso de tren, haciendo que vayan muy próximos entre ellos, con la mayor carga posible. Esto hace que un tren de viajeros pueda hacer disminuir la frecuencia y aumentar la distancia de seguimiento entre ellos, por su mayor velocidad.

Por lo tanto, si queremos recuperar una línea abandonada con la menor inversión posible, haciendo que sea rentable para el transporte de mercancías, el tráfico de viajeros queda descartado o relegado a una presencia muy testimonial.

2.4 Tecnologías de señalización

Con la introducción anterior, queda clara la justificación de lo que se pretende. Ahora es el momento de exponer brevemente qué puede aportar la tecnología de al objetivo original del trabajo. Vamos a hacer un repaso a las tecnologías actualmente en uso en la RFIG sobre sistemas de señalización primero y comunicaciones después para que, en los capítulos siguientes podamos optar por los más apropiados y elaborar un criterio que podamos considerar general para las líneas con las mismas características.

Nos centraremos más en su aplicación práctica para el TFM más que en su principio de funcionamiento, ya que, se trata de sistemas muy específicos que requieren una formación avanzada.

2.4.1 Sistemas de Protección de Tren

Se trata de aquellos sistemas destinados a evitar la colisión entre los trenes en circulación. Tenemos las siguientes alternativas:

- Enclavamientos y Bloqueos

Se llama enclavamiento de una estación al sistema lógico de seguridad que, en el ámbito de la misma, efectúa de manera más o menos automatizada, en respuesta a las peticiones del operador, las comprobaciones oportunas y, si proceden, las maniobras, inmovilizaciones, exclusiones, apertura de señales (autorizaciones de movimiento), así como las liberaciones pertinentes una vez efectuado el movimiento.
Dicha denominación se extiende, impropiamente, a la instalación en su totalidad, incluyendo los elementos de señalización, cantonamiento y maniobra

Se llama “bloqueo entre dos estaciones” a la relación de dependencia que se establece entre ambas para poder expedir circulaciones desde cada una de ellas hacia su colateral. Dicha relación de dependencia tendrá distintos grados según el tipo de enlace que una a las estaciones.

En cualquier bloqueo en vía única el grado de dependencia será total. No pueden circular trenes sin el acuerdo previo entre las dos estaciones. En un bloqueo automático en vía doble (no banalizada) el grado de dependencia será parcial. Para poder autorizar la salida de un tren solo necesito que el primer cantón del trayecto esté libre, no necesito acuerdo previo con la otra estación.

Los distintos sistemas de bloqueo deben garantizar la inexistencia de alcances y colisiones pudiendo, en determinados casos, compatibilizar las maniobras que se realicen por la banda de una estación con la llegada de un tren por esa banda procedente de su colateral.

Los equipos, lógicos y de comunicaciones, que materializan esas relaciones de dependencia reciben el nombre de equipos de bloqueo. Evidentemente, siempre deberá existir un modo de comunicación entre ambas (telefónico, cableado específico, líneas de transmisión de datos, radio, etc).

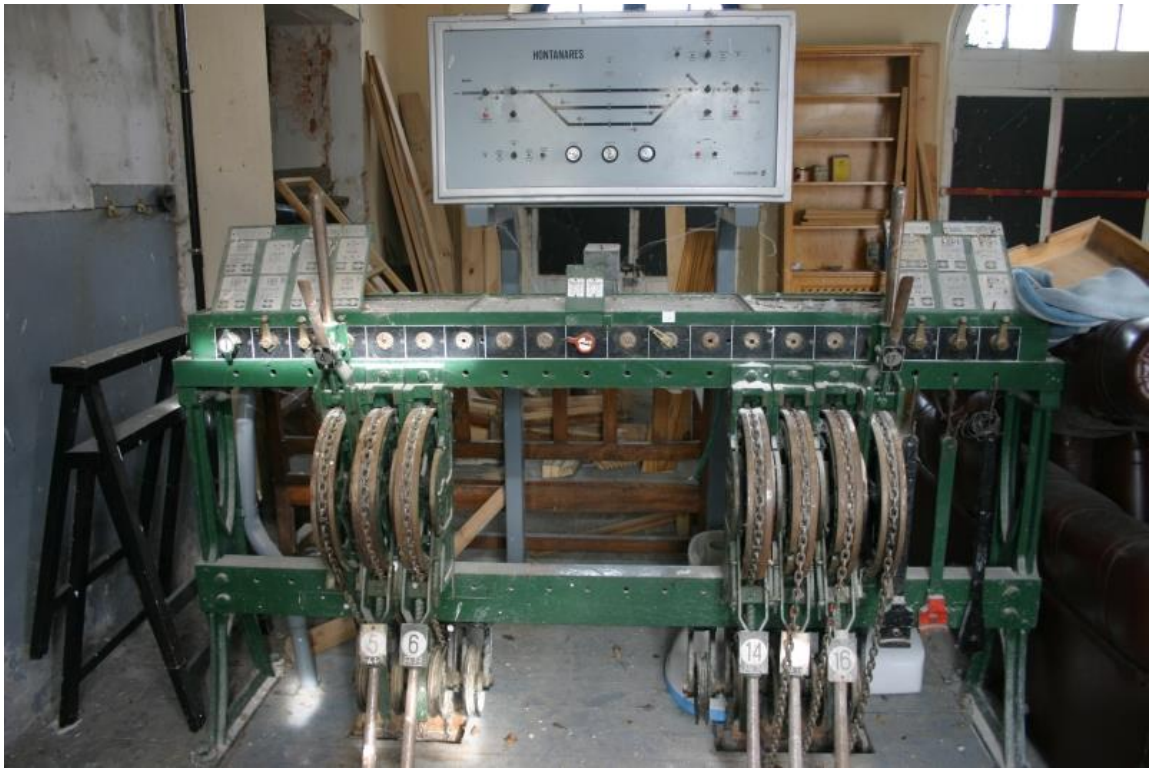
A lo largo de la historia del ferrocarril se han realizado los enclavamientos con las tecnologías disponibles en cada momento, desde sistemas puramente mecánicos, hasta llegar recientemente a los sistemas electrónicos controlados por procesadores, pasando por los relés electromecánicos.

Entre las tecnologías más antiguas (aún en uso en la RFIG), se encuentran las cerraduras Bouré de los Enclavamientos **Mecánicos**. El sistema de enclavamiento está basado en la inmovilización de los aparatos (señales mecánicas incluidas) mediante cerraduras compuestas de dos elementos, uno fijo y otro móvil que pueden abrocharse entre sí. El fijo es solidario al propio aparato, el móvil está sujeto mediante una cadena a un punto fijo [22].

15 - Marmita enclavada con cerradura Bouré

La cerradura puede tener dos o más llaves, una denominada fija, sujeta a la armadura y otra u otras denominadas móviles, que pueden desprenderse del conjunto cuando la cerradura está abrochada y cerrada.

Las incompatibilidades entre los diversos aparatos y las señales se establecen mediante cerraduras centrales. Los aparatos (agujas, señales, etc.) se manejan por medio de palancas y transmisiones rígidas, bifilares, hidráulicas o neumáticas. La concentración de todas las palancas que maniobran los distintos aparatos y señales de una estación, se denomina puesto central o mesa del enclavamiento.



16 - Mesa de enclavamiento mecánico de una estación

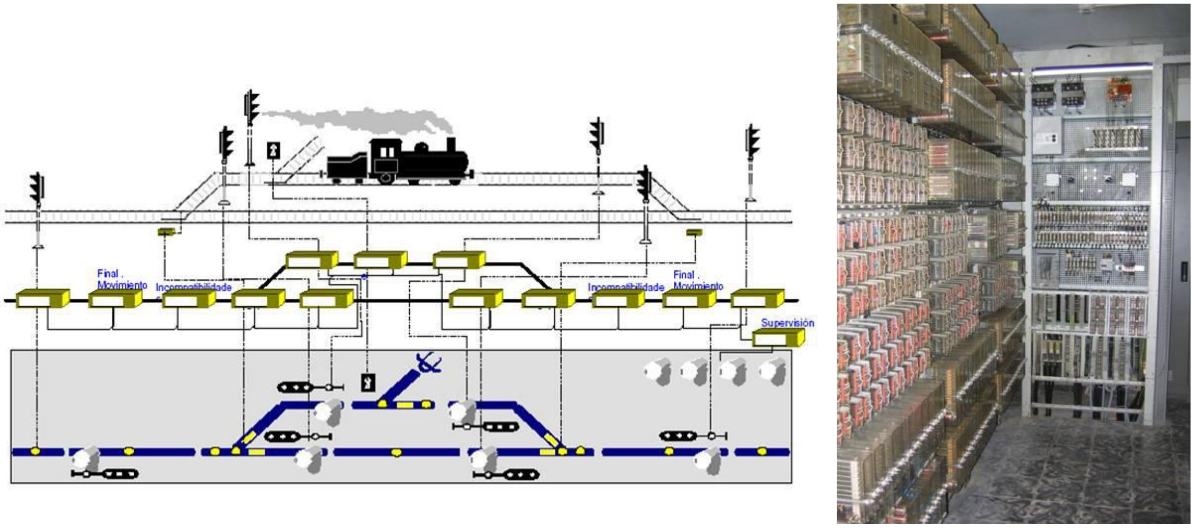
El siguiente paso evolutivo fue la aparición de los Enclavamientos **Eléctricos** (muy ampliamente extendidos en la RFIG hoy en día). También llamados sistemas de lógica cableada. El sistema lógico de seguridad se implementa por medio de relés. Permiten maniobrar los elementos a mayor distancia y de manera local. Permiten ampliar y hacer mas flexible el campo de las relaciones de dependencia. Los mandos y comprobaciones se realizan y obtienen con mayor rapidez.

Existen dos tipos:

- Sistemas de cableado libre: Las ecuaciones lógicas de funcionamiento se establecen realizando las conexiones necesarias entre los distintos elementos.

- Sistemas geográficos: Las conexiones de los circuitos eléctricos se disponen conforme a un esquema geográfico, en el cada elemento del

campo, tal como agujas, señales, etc. Lleva asociado en la cabina del enclavamiento un módulo, llamado grupo; los grupos están conexionados en el mismo orden que dichos elementos se encuentran en el campo. Este es un sistema modular en el que todos sus módulos están conectados entre sí por medio de mangueras geográficas. Estas mangueras se utilizan para el intercambio de información entre los diversos grupos de relés. En la figura siguiente vemos un ejemplo de este tipo de enclavamiento en el que también vemos representado el enlace de cada uno de los grupos con la mesa de mando.



17 - Cableado geográfico y cabina de relés

El principio de funcionamiento a nivel lógico es el mismo para todos los sistemas. Mientras que los enclavamientos mecánicos establecen las incompatibilidades y condiciones mediante barras, resortes, etc., los enclavamientos eléctricos utilizan la lógica cableada para establecer las condiciones de funcionamiento y los electrónicos lo hacen mediante lógica programada utilizando sentencias o ecuaciones booleanas

Por último, los anteriores evolucionan hacia los Enclavamientos **Electrónicos**. Estos usan ordenadores y una lógica programada para controlar el estado y las órdenes hacia los equipos de campo (señales, accionamientos de aguja. detección de tren…).

Los sistemas de enclavamiento electrónico deben cumplir ciertos criterios básicos de diseño como son:

- Alta disponibilidad: Esto se consigue utilizando sistemas modulares, minimizando al máximo el número de componentes de alta fiabilidad necesarios y, básicamente, redundando los sistemas.
- Flexibilidad de criterios de explotación: Deben poder adaptarse a diferentes entornos de operación y a una amplia gama de tamaños de estaciones.
- Seguridad de operación: Siguiendo los estándares más exigentes en conformidad con las normativas y protocolos internacionales.

- Facilidad de operación: Tanto local como remota, basada principalmente en el uso de sistemas video-gráficos y funciones automatizadas.
- Facilidad de integración: Con el resto de los sistemas de señalización; sistemas ATP, sistemas de Telemando, sistemas de Detección, etc.
- Diseño estructurado: Lo que permite menores costes de instalación, validación y puesta en servicio.
- Facilidad de mantenimiento: Gracias, entre otras, a la modularidad y la disponibilidad de herramientas de diagnóstico específicas.
- Normalización: Equipos desarrollados bajo los estándares CENELEC (Comité europeo de normalización electrotécnica) aplicables a equipos electrónicos para la señalización ferroviaria.

En todos los casos la conversión de un enclavamiento normal en uno de alta disponibilidad pasa por un aumento significativo del hardware. Es necesario, como mínimo, duplicar el procesamiento de la lógica de control y los canales de comunicaciones en configuraciones típicas “Hot-Standby”. En estos, se dispone de un equipo en funcionamiento activo, y el otro encendido y en condición de entrar en servicio activo instantáneamente en caso de fallo del primero. El sistema en espera activa procesa las entradas trabajando conjuntamente con el sistema por defecto, pero con sus salidas desconectadas. En caso de fallo del sistema primario toma el control de manera prácticamente instantánea (algunos milisegundos) sin pérdida de datos.

18 - Enclavamiento Electrónico de CAF

Las capacidades básicas de un Enclavamiento Electrónico que lo diferencian de los anteriores son las siguientes:

- Supervisión y control de los elementos de campo:
  - Motores de aguja, pasos a nivel, señales, indicadores luminosos de velocidad y dirección, circuitos de vía, contadores de ejes, etc.
- Operación manual y automática de la estación:
  - Cambio de agujas, itinerarios, etc.
  - Bloqueos automáticos.
  - Gestión automática de alarmas.

    - Registro cronológico de comandos, estados de elementos y alarmas.
- Alto nivel en capacidades de comunicación:
    - Preparado para su integración en centros de control remotos, como CTC's.
    - Operación local o remota desde el puesto de operador o PC.
    - Mantenimiento local o remoto desde el terminal de mantenimiento basado en PC.

Este tipo de enclavamientos suele ir asociados a un terminal video-gráfico de operador. Se trata del elemento básico para la operación local del enclavamiento electrónico es el terminal video-gráfico de operador. Este terminal de operador presenta el estado del tráfico en la estación, así como la situación de los diferentes aparatos de vía. Además, permite al operador emitir los mandos sobre la instalación.

19 - Terminal de Operador

- Sistema ASFA

El sistema ASFA está constituido por dos equipos: el equipo de tierra instalado en vía y el equipo de máquina instalado en la máquina. El equipo de tierra instalado en la vía, se compone de una serie de dispositivos relacionados con las señales y que suministra información a la locomotora a su paso por ellos, de forma puntual [23].

El sistema procesa la información procedente de las señales y la envía a los trenes utilizando para ello las balizas como medio de transmisión. El sistema embarcado utiliza esta información para generar las curvas de control correspondientes y actúa sobre el freno cuando detecta que se está excediendo el límite de la velocidad supervisada.

Las balizas ASFA instaladas en la vía proporcionan información previa del aspecto de la señal más próxima al tren en su sentido de marcha (baliza previa) e información al paso de dicha señal (baliza pie de señal); también envían información de las señales de Pasos a Nivel, Zonas Límite de Parada, Limitaciones de Velocidad y Cambios de Señalización (AV-CONV).

El sistema de captación del tren consiste en un circuito resonante, que oscila a una determinada frecuencia (Frecuencia Permanente, FP). Cuando el captador pasa por encima de una baliza, pasa a oscilar a la frecuencia de resonancia del circuito establecido en la baliza, con la que sintoniza mediante acoplamiento inductivo, recibiendo el aspecto de la señal correspondiente.

En la actualidad el sistema ASFA está instalado en la Red Ferroviaria de Interés General, en vías con cantonamiento Convencional y Ancho Métrico, donde por norma general es el principal sistema de señalización, y en vías de Alta Velocidad, donde se utiliza como sistema de respaldo de otros sistemas de protección del tren.

El desarrollo del sistema ASFA Digital proporciona una mejora respecto al tratamiento de la información proporcionada por las balizas ASFA actuales. Con el nuevo sistema ASFA se consigue aumentar el número de informaciones enviadas desde la vía para que puedan ser captadas por los nuevos equipos embarcados.

La información que suministra cada baliza es una cierta repetición de la indicación que presenta su señal asociada. Esta repetición está simplificada en las indicaciones de anuncio de parada (amarillo), anuncio de precaución (verde-amarillo) y anuncio de parada inmediata (amarillo intermitente) que se traducen en una misma información de la baliza (L1).

En el cuadro siguiente se resumen todas las señales con sus indicaciones y las informaciones de las balizas asociadas:

L1	AMARILLO; VERDE-AMARILLO; AMARILLO DESTELLANTE	60.000 Hz
L2	VERDE DESTELLANTE	64.020 Hz.
L3	VERDE	68.310 Hz
L7	CONTROL DE VELOCIDAD	88.540 Hz
L8	ROJO	95.500 Hz

20 - Frecuencias de resonancia según el aspecto de la señal

Actualmente el sistema ASFA Digital se encuentra finalizando su fase primera de implantación, donde los vehículos con ASFA Digital embarcado interaccionan con la señalización actual, generando controles a partir de sólo cinco frecuencias de funcionamiento. Debido a esta limitación, la misma

frecuencia es empleada para presentar en cabina varias indicaciones, siendo el maquinista el responsable de distinguir entre ellas y seleccionar el control que corresponda.

De forma genérica, las balizas van asociadas a las señales en un número máximo de dos balizas por señal.

21 - Colocación de balizas ASFA

Se puede comprobar que la comunicación es puntual, cuando existe una señal, ya que se instalan a 5 metros y a 300 metros antes de las mismas. Esto significa que donde no hay señales durante un espacio, más o menos amplio, no hay información disponible en cabina para el maquinista, lo cual, supone una traba para lo que se pretende en este trabajo.

- Sistema ERTMS-ETCS

No se pretende aquí detallar cómo funciona el sistema, porque no es el objeto del trabajo, sino ver en qué medida cada nivel nos puede afectar para decidir qué tecnología implantar en las líneas a renovar para el transporte de mercancías. Por tanto, nos centraremos en aportar la siguiente información general y relacionada con la comunicación tren-tierra.

El Sistema ERTMS es un sistema de mando y control de trenes que fue adoptado por la Unión Europea para equiparar todas las nuevas líneas que se construyan en los países que la componen. El objetivo es que la señalización y las comunicaciones entre vía y equipos de a bordo sean compatibles en toda Europa y se posibilite la interoperabilidad de las circulaciones ferroviarias entre los diversos Estados de la Unión Europea [24].

El sistema ERTMS se compone de varios subsistemas (o capas):

- ETCS: se encarga del control y la seguridad del tráfico, es decir: del bloqueo. Es un sistema de control que permite evitar que un tren supere las velocidades máximas establecidas o las señales que indican parada, es un sistema mejorado sobre los sistemas de alarma automáticos ya instalados en muchos países europeos. Este sistema dispone de 5 niveles.

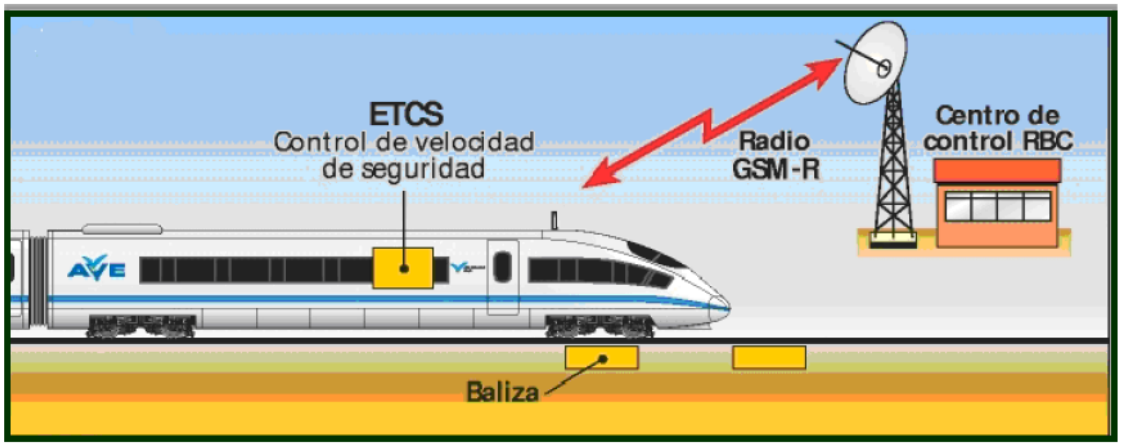
- ETML: se encarga de la gestión y regularidad del tráfico en los Centros de Regulación y Control (CRC, equivalente al CTC de muchas líneas convencionales), que es el lugar desde el que se dirige el tráfico.

- GSM-R es una comunicación celular digital específica para el tren, se encarga de la transmisión de voz y datos entre el tren y las instalaciones fijas. Este sistema es similar a los sistemas GSM públicos en cuanto a arquitectura de red, pero utiliza una banda de frecuencias separada y proporciona servicios exclusivos para el ámbito ferroviario: llamadas de grupo, llamadas de emergencia, numeración funcional, etc. Imprescindible con ETCS 2 y 3.

- Sistemas de posicionamiento (Galileo, GPS o GLONASS), sirven para localizar a los trenes con ETCS 3.

Muchas veces se confunde el todo con la parte y se habla, incluso en documentos oficiales, de “ERTMS nivel 1 ó 2”. Pero el ERTMS es el “todo” que engloba a los diferentes subsistemas, también a los niveles de ETCS, por tanto, no puede hablarse de "ERTMS 1 ó 2”

Como estamos viendo en España. el GSM-R también puede actuar como apoyo en el nivel 1 y en otro tipo de líneas, como las Cercanías, al igual que el ETCS, que está instalado en 73 km de la C4 de Madrid (para 160 km/h) y se pondrá en la C3, y está en 123 trenes Civia, 20 S-451, 31 S-446 y 43 S-447; también en las locomotoras S-252 para Francia. En el mismo sentido se está instalando GSM-R en líneas convencionales (ya está en las Cercanías de Madrid, Bilbao y Santander) para sustituir al Tren-Tierra [25].



22 - Subsistemas básicos del ERTMS

El sistema ETCS (mal llamado ERTMS a veces), tiene 5 niveles (0, 1, 2, 3 y STM), 17 modos técnicos de conducción (desde On Sight hasta Full Supervisión) e innumerables versiones de software SRS (normalmente desde la 2.3.0d hasta la 3.1.1.2 pasando por el estándar europeo 3.0.0). Cada nivel tiene una característica:

- Nivel 1

Desde 2002 permite hasta 300 km/h. Está basado en circuitos de vía o contadores de ejes, y ordena, mediante las eurobalizas, autorizaciones de movimiento con su curva de velocidades hasta la siguiente baliza. También se transmite información antes de las señales mediante los eurolazos, aun así, la comunicación es puntual. Permite una frecuencia de paso de un tren cada 5 minutos y medio a 300 km/h. Por comparación, con ASFA es cada 8 minutos a 200 km/h.

- Nivel 2

Desde 2006 permite aumentar la velocidad hasta 350 km/h ya que la información se refiere a varios cantones. Además, la supervisión y comunicación es continua entre el RBC, las balizas y el tren gracias al GSM-R. En Nivel 2 no es necesario instalar señales laterales (el cantonamiento sigue siendo fijo gracias a las pantallas virtuales), pero sí las balizas y los circuitos de vía o contadores de eje, también se utiliza las autorizaciones de movimiento (MA). Permite una frecuencia de paso de un tren cada 2 minutos y medio a 350 km/h gracias a la información continua y a los cantones virtuales.

- Nivel 3

Este nivel acaba de empezar a desarrollarse, pero no estará basado en los circuitos de vía sino en la situación de los trenes generada por el propio tren gracias al GSM-R o a los sistemas de posicionamiento por satélite. En los niveles 1 o 2 basta que un tren ocupe un circuito con solo el último vehículo para que todo el cantón esté ocupado para el sistema, es decir: varios kilómetros.
Con los llamados cantones móviles se permite mayor proximidad entre los trenes (mayor saturación) y, además, el N3 tiene la enorme ventaja de que se prescinde de la señalización lateral y de los circuitos de vía. El problema está en cómo asegurarse de que no se ha producido una rotura de carril si no hay circuitos de vía. La velocidad máxima de este nivel será de 500 km/h.

- ERSAT EAV (ERTMS on Satellite-Enabling Application and Validation)

Se trata de un proyecto piloto financiado por la European Global Navigation Satellite Systems Agency), coordinado por Ansaldo STS e instalado en 2015 en 50 kilómetros del ferrocarril Cagliari-San Gavino, en Cerdeña (Italia).9 El elemento más novedoso es que utiliza balizas virtuales generadas por el satélite cada 50 metros; para asegurar su integridad, el tren recibe (en cabeza y cola) la señal de los satélites mediante el LDS (Location Detection System).

Para abaratar el coste, en lugar de utilizar GSM-R, usa GSM de las redes públicas. Las primeras pruebas abarcan desde el 01/02/2015 hasta el 01/02/2017, pudiendo estar en funcionamiento en 2022.8 También está el EATS (ETCS Advanced Testing and Smart Train Positioning System), un proyecto de investigación colaborativa financiado por el Séptimo Programa Marco de Ciencia e Innovación de la Comisión Europea, que arrancó en octubre de 2012 con el objetivo de facilitar la migración a ETCS nivel 3 por

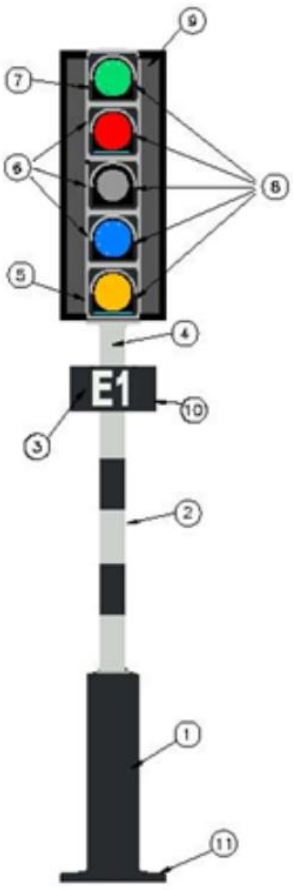
medio de la mejora de los sistemas de pruebas en laboratorio para reducir el tiempo y esfuerzo en el proceso de verificación y certificación.10

Por último, el nivel 0 se utiliza en zonas no equipadas con ETCS y el nivel STM se emplea cuando se circula al amparo de otro sistema (en España: ASFA o Ebicab). El módulo STM traduce la información del otro sistema al entorno ETCS, siendo visible en el Interfaz Máquina Conductor.

- Señales, relés, accionamientos de aguja y cableado

Los sistemas actuales de señalización están fundamentados en la observación e interpretación por los maquinistas de las señales colocadas a lo largo de la vía. Bien es verdad que en los últimos tiempos se ha complementado con la advertencia y frenado automático, con la repetición de las señales en la cabina de conducción y con la comunicación tren-tierra. Sin embargo, las señales colocadas en la vía siguen teniendo una importancia fundamental [25].

De aquí se deduce que las señales deben ser de construcción robusta, que deben dar indicaciones, sin lugar a dudas y que su funcionamiento debe ser eficaz. Desde el punto de vista constructivo, las señales pueden ser altas o bajas, llevando a veces algunos elementos adicionales, tales como señales direccionales o indicadores de velocidad, etc.



ITEM	DESIGNACIÓN
1	PEANA
2	MÁSTIL
3	PLATAFORMA HORIZONTAL
4	MINIMÁSTIL
5	MÓDULO INFERIOR
6	MÓDULO INTERMEDIO
7	MÓDULO SUPERIOR
8	MARCO DEL FOCO CON MINIVISERA
9	PANTALLA DE CONTRASTE
10	RÓTULACIÓN DE LA SEÑAL
11	SISTEMA DE ABATIMIENTO

23 - Plano de señal modular de LED

En general la visibilidad de una señal en vía recta debe ser de 1.000 metros, como mínimo, para el foco verde luciendo y en les condiciones más adversas de luz natural, es decir con el sol de frente y bajo (al amanecer o al atardecer).

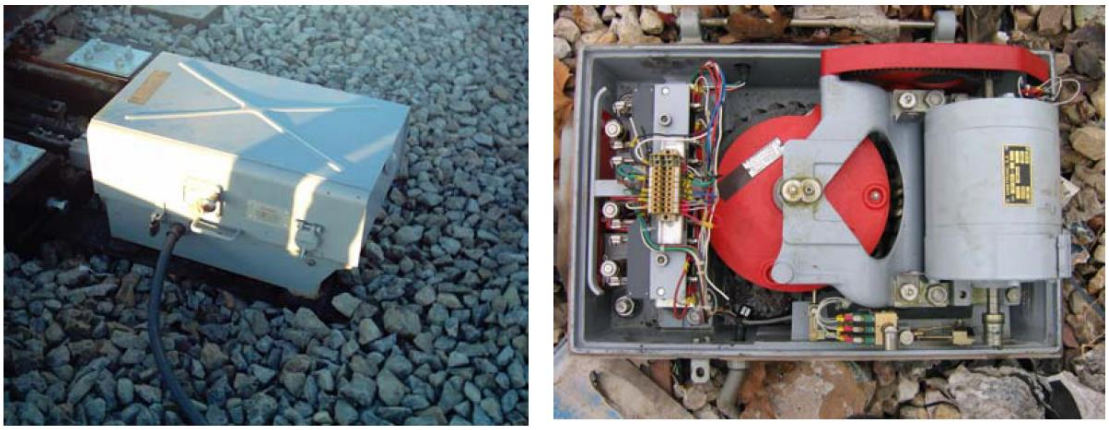
Un relé es un electroimán capaz de atraer una armadura de la que forman parte varios contactos eléctricos. Dicha armadura puede ocupar dos posiciones definidas llamadas "posición de trabajo" cuando la tensión está aplicada a la bobina del electroimán y "posición de reposo" cuando dicha bobina no recibe alimentación.

Los contactos establecidos en estas dos posiciones se llaman, respectivamente, contactos de trabajo y contactos de reposo. Respecto a su forma de utilización en las instalaciones de señalización, los relés pueden ser de dos clases:

- Relés de seguridad o no controlados (tipo N). Son los que por sí mismos han de satisfacer las garantías de funcionamiento sin el auxilio de otros relés y sin tener que ser controlados. En particular, deben cumplir la condición de desprendimiento seguro de la armadura por la acción de la gravedad independientemente de otras fuerzas y apertura segura de sus contactos, para lo cual, en sus contactos de trabajo, al menos uno de sus elementos será de carbón o carbón plata, de forma que dichos contactos sean insoldables.

- Relés controlados (tipo C). Son aquellos cuyo funcionamiento ha de ser controlado para poder ser utilizados en instalaciones de señalización.

En la mayoría de las instalaciones actuales de señalización, las agujas son accionadas eléctricamente y a distancia. Solamente las agujas de vías secundarias son accionadas a mano, y tratándose de agujas de confluencia de vías secundarias con vías principales, aunque sean accionadas a mano, suelen tener dispositivos de encerrojamiento y de control de dichas agujas. Este es el caso que nos podemos encontrar en las líneas a renovar objeto de este trabajo.

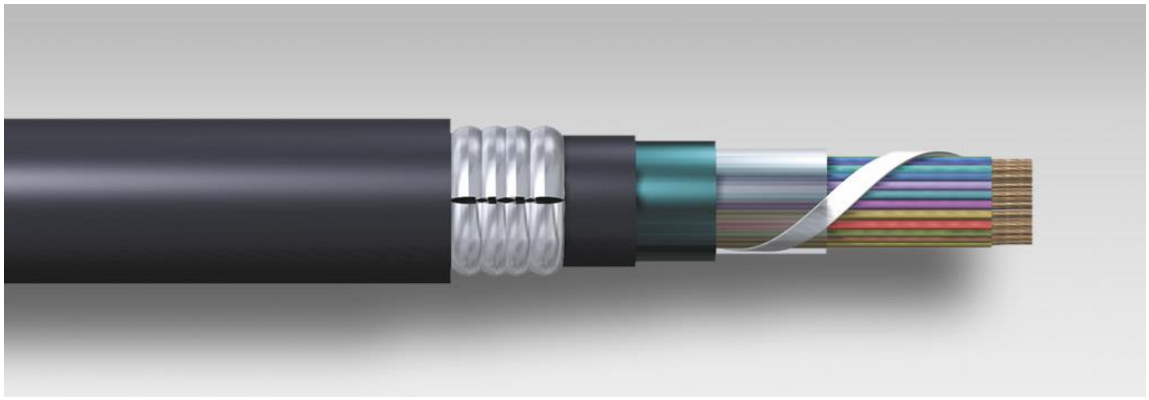


24 - Accionamiento de aguja

El procedimiento más empleado de mover las agujas es el accionamiento eléctrico, y en su diseño se ha conjugado la necesidad de realizar su actuación en un tiempo determinado con la potencia, precisa del motor eléctrico.

Sin embargo, hay puntos, como las vías de bajada de los vagones en las estaciones de clasificación o en las líneas de gran velocidad, en que el tiempo empleado por el accionamiento eléctrico normal es excesivo, y hay que sustituirlo por otro accionamiento eléctrico de acción más rápida o por un accionamiento electrohidráulico.

Los cables de señalización son los que enlazan los equipos de señalización con los distintos elementos de la instalación: armarios, motores de aguja, señales, etc. Están constituidos por conductores de cobre electrolítico, de 1,4 mm Ø y 1,5 mm2 de sección, con un aislamiento de polietileno, cableados en capas concéntricas, con un relleno antihumedad de vaselina, con cinta de plástico de sujeción y cubierta interior de polietileno, con armadura de acero corrugado, y con cubierta exterior de polietileno color negro. La resistencia de un conductor es de 12,1 ohmios/km, y el aislamiento de un conductor respecto a los demás conductores conectados entre sí, a la armadura y a tierra es de 25.000 megohmios/km [26].



25 - Cable de cuadretes de Cervi homologado para ADIF

Los cables de telemando y telefonía se utilizan, como su nombre indica, para la transmisión de las señales de telemando y de la telefonía de señalización. Generalmente forma parte del cable de comunicaciones por precisar las mismas características de construcción. Estos cables están constituidos por conductores de 0,9 mm Ø, cableados en cuadretes, con bobinas de carga cada 1.840 m, y con ellas tiene una atenuación de 0,26 db/km. El aislamiento de los conductores es polietileno, con vaselina de relleno antihumedad, cinta plástica de sujeción, pantalla de aluminio, armadura de acero corrugado y cubierta exterior de polietileno color negro.

Los principales elementos se montan sobre el terreno como complemento de los cables son los armarios y las cajas terminales. Los armarios están dispuestos para recibir cables, efectuar la conexión de sus conductores y alojar diversos equipos correspondientes a las instalaciones de señalización,

principalmente los relacionados con los circuitos de vía y con las señales. Las cajas de terminales sirven para recibir varios cables y efectuar la conexión de sus conductores.

2.4.2 Sistemas de Detección de Tren

Estudiaremos a continuación los sistemas destinados a conocer en todo momento la posición del tren sobre la vía, con la debida certeza, que será el apoyo a los sistemas de protección de tren vistos anteriormente. Podemos destacar los siguientes:

- Circuitos de Vía

Para regular el tráfico ferroviario es necesario conocer de manera fiable y sobre todo segura la posición de los trenes a lo largo de la línea. El dispositivo más utilizado universalmente y a la vez el primero que se empleó es el denominado Circuito de Vía.

El circuito de vía es la base de la señalización moderna. Su propósito primordial es comprobar que una sección de vía está libre de vehículos. Una vez hecho esto, se pueden accionar las agujas y abrir las señales para que los trenes puedan circular con la certidumbre de que se pueden hacer los movimientos con seguridad. El segundo propósito de un circuito de vía es detectar la presencia de un tren y enclavar el itinerario que va a seguir, para garantizar así una circulación segura.

De forma genérica, para los modelos antiguos de 50Hz, el Circuito de Vía utiliza los carriles como conductores y está constituido esencialmente por:

- Una sección de vía aislada
- Un circuito de alimentación
- Un circuito de recepción

Los carriles son utilizados como conductores eléctricos, que unen una fuente de energía eléctrica situada en un extremo del circuito de vía con un relé, que se encuentra en el otro extremo. El tramo de vía se limita mediante el corte de los carriles y la instalación en ellos de unas juntas aislantes realizadas con madera o un material plástico. También se pueden limitar los tramos de vía o cantones mediante otros medios eléctricos como ocurre en los circuitos de vía sin juntas.

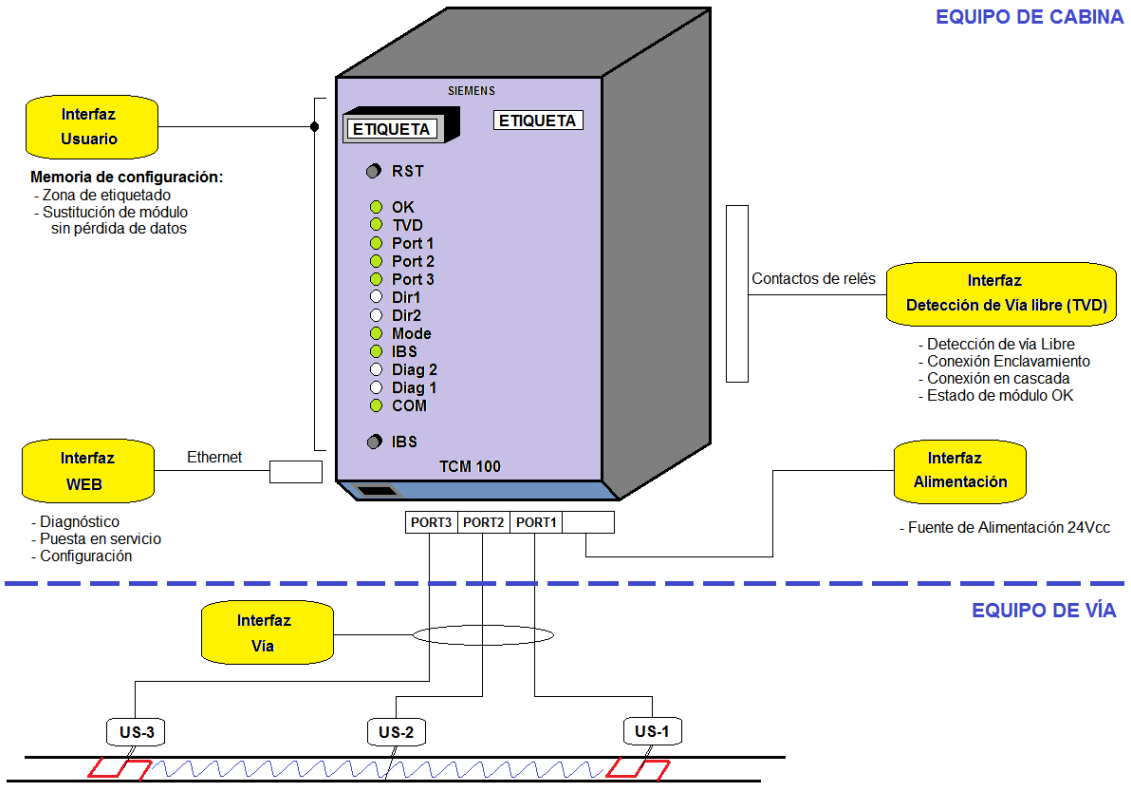
No es objeto del trabajo aportar más detalle del funcionamiento de estos modelos antiguos. Nos vamos a basar en cambio, dentro de los de última tecnología, en el modelo TCM100 de SIEMENS [28], ya que hay multitud de sistemas de diferentes fabricantes con varios modelos a lo largo de la historia. Éste tiene las siguientes funciones:

- Generación y transmisión de señal de pulsos.

- Evaluación de la señal de pulsos transmitida por los circuitos de vía.
- Monitorización automática de los circuitos de vía y salida vital para indicación de libre y ocupado.

Para separar los circuitos de vía entre sí, se utilizan dos rangos diferentes de frecuencias con una disponibilidad de hasta 15 frecuencias en total. Las frecuencias de los circuitos de vía permiten la creación de juntas aislantes eléctricas. Para evitar interferencias entre los circuitos de vía adyacentes, así como en circuitos de vías paralelas, éstos deben configurarse con diferentes frecuencias.

La transmisión de datos basados en telegramas acerca de la información de detección de vía libre circula por los carriles de la vía y los cables existentes entre el transmisor y receptor/es están protegidos contra posibles inducciones de la corriente de tracción u otra interferencia eléctrica mediante el método especial de modulación de frecuencia (FSK – Frequency-shift Keying).



26 - Estructura del TCM100 de SIEMENS

El TCM 100 se conecta a cualquier tipo de enclavamiento electrónico/relés, sea cual sea su tipo constructivo, a través del interfaz de Detección de Vía libre (TVD) con contactos de relés libres de potencial.

- <u>Contadores de Ejes</u>

Los contadores de ejes son sistemas para la detección de tren, siendo utilizados como alternativa a los circuitos de vía.

Se utilizan para detectar la presencia de trenes dentro de unas secciones definidas de la vía. A diferencia de los circuitos de vía, su funcionamiento no depende de la resistencia del balasto. Por ello, los contadores de ejes están especialmente indicados para secciones largas, y representan el único medio de detección automática de trenes en vías que no pueden aislarse convenientemente. Utiliza un equipo instalado en el carril llamado pedal electromagnético que es el elemento contador.

Este tipo de detección presenta ciertas ventajas respecto a los circuitos de vía convencionales:

- Longitud de cantón de bloqueo prácticamente ilimitada
- No necesita juntas aislantes
- No se ven afectados por la resistencia de balasto
- Prácticamente libre de mantenimiento
- Fácil adaptación a vías existentes o antiguas

Se pueden instalar en:

- En cantones de bloqueo
- En vías de estación, especialmente donde el balasto sea de baja calidad
- En líneas con traviesas de acero, puentes metálicos y zonas mineras
- En túneles o en líneas donde haya mucha humedad o inundaciones
- En zonas de riesgo (túneles, viaductos, …) como sistema de detección redundante con circuitos de vía existentes

27 - Sistema de contadores de ejes de Electrans

Vemos que para el trabajo en el que nos centramos, los contadores de ejes pueden ser una alternativa económica y de fácil mantenimiento.

2.5 Tecnologías telecomunicaciones ferroviarias

A continuación, explicaremos qué puede aportar la tecnología de telecomunicaciones al trabajo que nos ocupa. Vamos a hacer un repaso a las tecnologías actualmente en uso en la RFIG sobre sistemas de telecomunicaciones. Recordemos que nos pretendemos centrar en su

aplicación práctica sobre el ferrocarril, más que en su principio de funcionamiento, que, en buena parte, se ha visto ya durante las diferentes asignaturas del Máster.

2.5.1 Comunicaciones Fijas

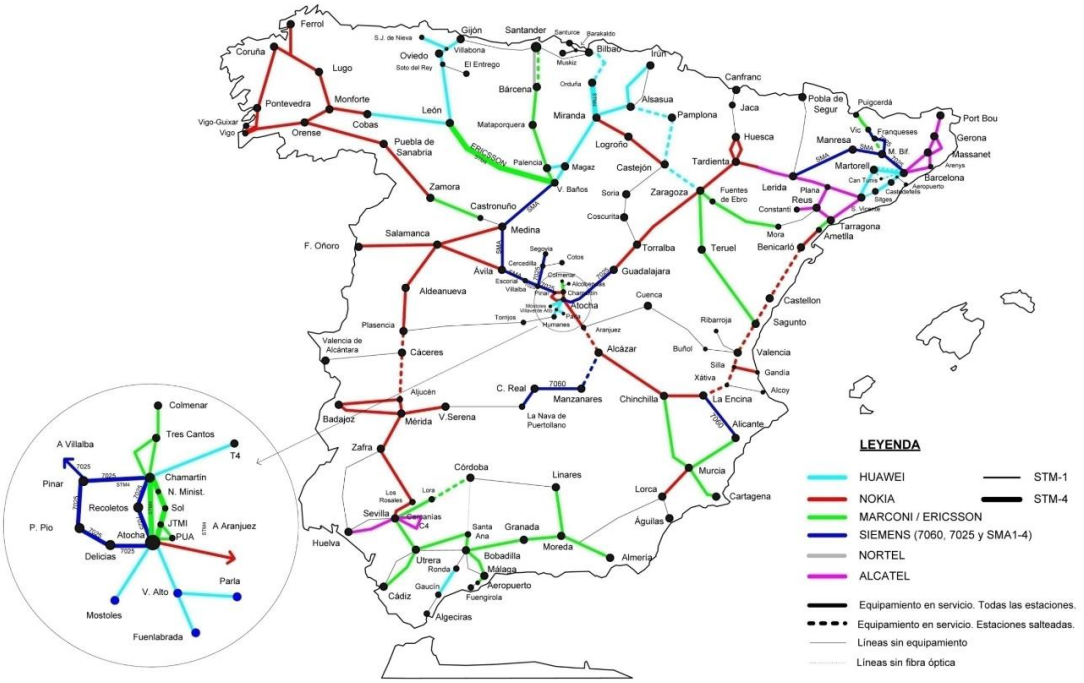
Para asegurar que los equipos de campo, centralizados normalmente en las estaciones (o dependencias) se pueden comunicar y controlar desde los Puestos de Mando o CTCs ubicados remotamente, es preciso la instalación de una infraestructura de red. Las redes de comunicaciones cableadas existentes actualmente en la RFIG española se centran en los siguientes sistemas de transmisión, los cuales son empleadas como redes multiservicio para la transmisión de datos, voz y video [29].

- Red de Acceso

En las infraestructuras ferroviarias de la RFIG, normalmente, estas redes proporcionan acceso a todos los posibles servicios en las estaciones. También proporciona conectividad “regional”, esto es, cubre distancias cortas por lo que debe considerarse la reutilización de la capacidad a medida que queda libre. Se realiza pues un diseño y despliegue “capilar”, cubriendo toda la red y dando servicio a todas las estaciones.

Para ello, se debe prever la instalación de un equipo mínimo en estaciones que todavía no requieran servicios para evitar problemas posteriores. El proyecto debe asegurar siempre la existencia de repartidores, regletas de cables y equipos de energía básicos en todas las estaciones. Su mantenimiento, así como su gestión y supervisión pueden plantearse en ámbitos regionales. (Valencia, Barcelona, A Coruña...). La capacidad total suele ser media y limitada (entre 8-155 Mbps). Además, el diseño debe proporcionar rutas alternativas sólo para el servicio que lo requiera. En la RFIG se licitan las instalaciones tramo a tramo, dando lugar a una red multimarca: Huawei, Nokia, Marconi, Alcatel, Siemens...

Este gráfico ilustra orientativamente la diversidad de fabricantes que han instalado redes de acceso STM1-STM4 en la geografía ferroviaria:



28 - Redes SDH de acceso STM1/4 en a RFIG

Para su dimensionamiento, en el caso habitual, se diseña una red de acceso SDH STM1 (155Mbps) ampliable a STM4 (655Mbps) instalando un nodo dimensionado (con el número de tarjetas y puertos) de acuerdo con las expectativas de requerimientos de capacidad en cada estación. En ocasiones, donde la red es exclusiva y no hay previsión de ampliación, como. en GSMR hasta 8-34Mbps (4-16 x 2Mbps) se puede dar el caso de emplear redes PDH.

Cabe destacar que se suele exigir modularidad en los equipos de modo que sean ampliables en capacidad sin afección a los servicios existentes. Un cambio en las necesidades de dimensionamiento no afectará a los servicios que ya se están proporcionando.

En cuanto a redundancia, ésta reside en los servicios, ya que los servicios críticos deben estar protegidos. Para ello, la red de acceso debe asegurar rutas principales y alternativas para cubrir estos servicios, ya sea, a través de capacidad en la propia red de acceso (con otros circuitos que recorran una ruta física distinta), o a través de capacidad en otras redes complementarias (radio, PDH, SDH...)

Las redes de acceso en las infraestructuras ferroviarias suelen transportar los siguientes servicios:

- Servicios de explotación básica.
    - Comunicación entre bifurcadores colaterales, muxes o nodos. (servicios en la trama de 2Mbps).
    - Comunicaciones entre BTS/puestos fijos de BR / Detectores caldeo.
- Otros servicios:

- Enlaces entre centrales de conmutación: Hipath / Hicom (2Mbps triangulados)
- Enlaces entre routers (triangulación UNSIR, 2-34-155Mbps, 10-100BaseT, 1-10 GB Ethernet...)
- Videovigilancia: circuitos desde las cámaras a la sala de control (2Mbps).
- Cajeros automáticos, cronometrías, ...

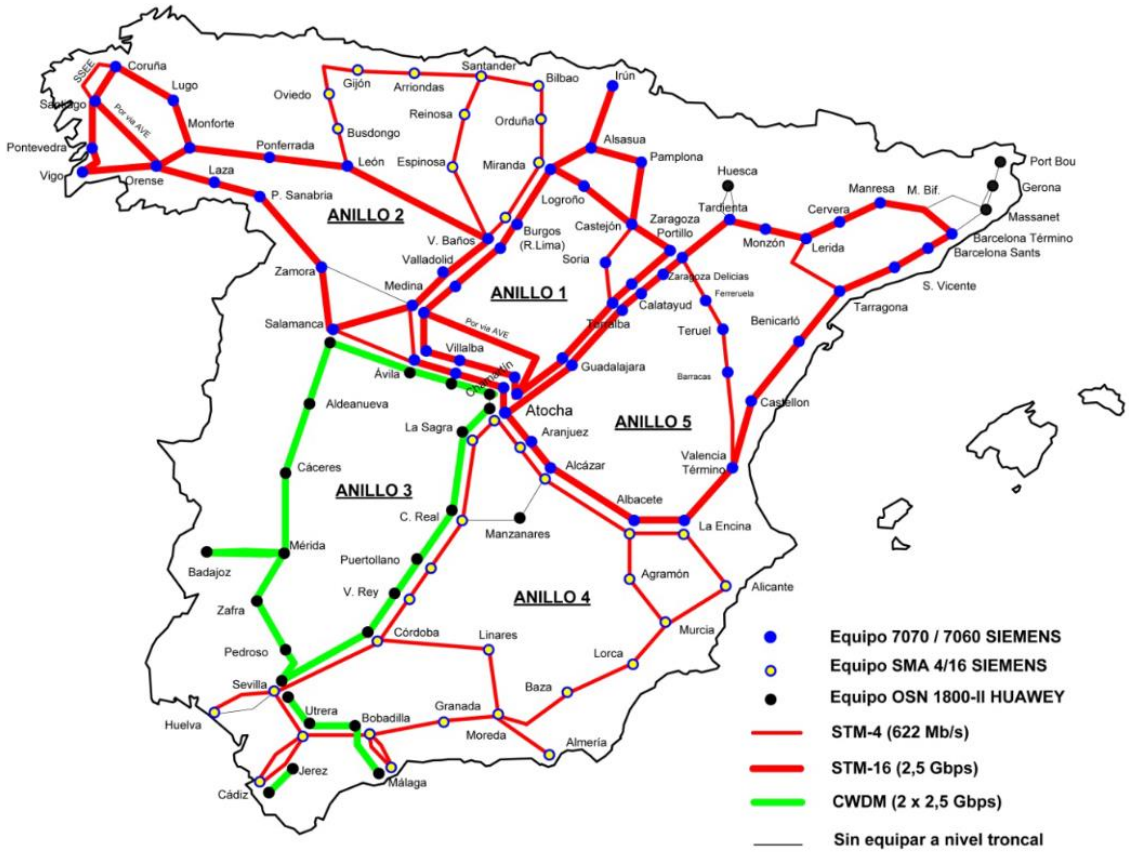
De modo que las redes de acceso son óptimas para transportar estos servicios básicos, de telefonía y de explotación.

- Red Troncal

Es importante conocer para nuestras líneas abandonadas, de dónde se puede segregar o crear un anillo de comunicaciones troncales en base a los existentes.

En las infraestructuras ferroviarias de la RFIG, normalmente, estas redes conectan servicios de todo tipo y muy lejanos en la geografía ferroviaria (por ejemplo, la red Gb Ethernet Sevilla-Barcelona). Dan servicio y se equipan sólo las estaciones más relevantes, salvando distancias de unos 100 km. El consumo de potencia es mayor tanto por la potencia del láser como por el consumo del equipamiento que pueden albergar. Se suele exigir que el diseño deba incluir equipos de alimentación potentes y redundantes.

Estas redes se basan en la fibra, por lo que es necesario contar con su disponibilidad y un punto de segregación de la misma en el entorno de la estación. Se dedican para proporcionar conectividad global. (red core / backbone) con capacidad y velocidades elevadas (STM16 = 2,5 Gbps). Como medida de redundancia, podemos proteger enlaces enteros gracias a las configuraciones en anillos /mallas,
La red se diseña desde una perspectiva global (tiende a ser de un sólo fabricante y se debe prever un centro de supervisión y gestión centralizado). Si bien, últimamente se está abriendo a otros fabricantes y tecnologías, como se puede ver en la siguiente figura que ilustra la situación actual:



29 - Redes SDH troncales en la RFIG

A diferencia de la red de acceso, la redundancia de la red troncal reside en la propia red. La red en sí (no cada servicio) puede ser dotada de robustez y redundancia que garantice la disponibilidad de toda ella ante anomalías. Existen mecanismos de protecciones de anillo, duplicidad de enlaces de fibra óptica. (anillos de 4 fibras) y de equipamiento de reserva que la garantizan, usando protecciones MS-P, MS-P/MS-SP Ring,… En redes de alta capacidad SDH hay protección de secciones totales o parciales de anillo (SPAN/RING SWITCH).

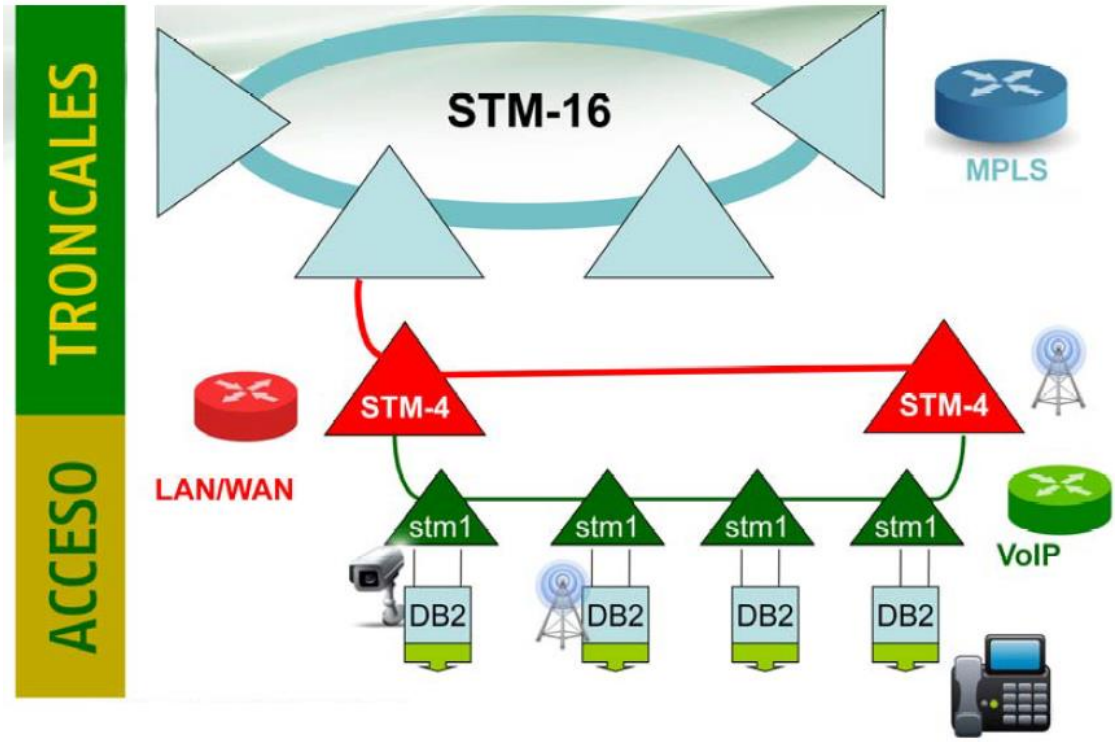
Las redes troncales de la RFIG disponen de excedentes de capacidad y rutas redundantes (implicando redundancia fibras y hardware), por lo que ofrecen la posibilidad de proteger enlaces enteros sin profundizar en los servicios articulares que por ellos viajan. En concreto, las redes SDH se organizan en enlaces o secciones de multiplexación (desde un nodo donde se procesa el tráfico a otro). Si disponemos de una sección de multiplexación redundante, todo el tráfico tiene la posibilidad de conmutar a dicha protección de manera automática.

Algunas redes de transmisión emplean la tecnología DWDM para transmitir distintos flujos de información en distintas direcciones sobre el mismo pelo de fibra óptica. En estos casos las estrategias de redundancia de SDH obviamente son inútiles frente a una ruptura de la única fibra, pero aun así protegerían el sistema frente a fallos en tarjetas o latiguillos de repartidores.

Por tanto, en Convencional, las redes de acceso son de tipo SDH de baja capacidad (STM1-4) instalando equipos multiplexadores ADM en todas las estaciones. Suelen interconectarse equipos de distintos fabricantes dado que cada trayecto sale a concurso de manera independiente. Sin embargo, aún quedan líneas con enlaces PDH (8/34Mbps).

En cuanto a las redes trocales de Convencional, se tiene una gran red troncal SDH STM16 de Siemens (y recientemente una CWDM de Huawei), donde se organizan anillos lógicos (no físicos) que garantizan la redundancia mallada de tuberías STM1 (protección MSP).

Por otra parte, están las redes de Alta Velocidad donde, en alguna ocasión se emplea PDH para conectar BTS en GSM-R, pero lo normal es instalar anillos de acceso SDH STM1-4 y troncales STM-16 (Ericsson). Las redes de datos de explotación y de acceso a datos se apoyan en redes MPLS de Ericsson.



30 - Interacción de redes de acceso y troncales

Como se puede observar en la figura anterior, redes de acceso y redes troncales no permanecen aisladas: De hecho, es habitual que redes de acceso (bifurcadores PDH y equipos SDH STM1) recojan y reúnan el tráfico local de cada estación que será introducido en un anillo de orden superior o de red troncal para su transporte a otras regiones, a menudo con tuberías STM1 punto a punto.

- Ethernet - MPLS

Los servicios necesarios para la gestión y explotación ferroviaria, habitualmente se despliegan en dos redes separadas (con equipamiento independiente), que pueden compartir medios comunes de transmisión y de transporte.

La red operacional o multiservicio es la encargada de desplegar los servicios relacionados directamente con la explotación ferroviaria. En casos concretos, estos servicios deben ser accesibles desde la red administrativa. Normalmente abarca, entre otros:

- Servicios de red fija: telefonía de explotación/grabadores, comunicaciones de señalización y energía para la explotación, ...
- Servicios radio: Telefonía móvil interna, señalización ERTMS....
- Servicios para estaciones/terminales: Energía, Automatización de Edificios, Seguridad y CCTV, Megafonía, ...
- Comunicaciones para detectores: caldeo/ejes, caída de objetos, viento lateral, ...

Por otro lado, la red administrativa es la encargada de hacer llegar los servicios para la gestión y administración general de la entidad, no relacionados directamente con la explotación ferroviaria, pero que en muchos casos también deben ser accesibles desde la red operacional. Normalmente abarca, entre otros:

- Servicios de telefonía administrativa
- Servicios IP corporativos
- Servicios de videoconferencia o telepresencia.

Nos centraremos en la red multiservicio, que es la que nos afecta directamente en el trabajo a realizar. Las características generales que perseguimos para este tipo de redes son las siguientes:

- Fiabilidad
    - Topología en anillo (ring) o en estrella redundante (hub and spoke).
    - Nodos con doble fuente de alimentación en corriente continua.
    - Nodos con doble supervisora.
- Seguridad
    - Red IP MPLS de nivel 3, que porpocione VPNs independientes por cliente y servicio.
    - Posibilidad de proporcionar servicios de nivel 2 a través de VPLS.
    - La conexión a otras redes se realiza a través de un firewall.
- Alta capacidad
    - Interfaces de usuario en Gigabit Ethernet.
    - Conexiones entre nodos a través de fibra óptica con conexiones Gigabit Ethernet o a través de sistemas de transmisión SDH.

En cuanto al tipo de acceso, se entiende por Accesos Internos aquellas conexiones que provienen de dispositivos conectados a la misma Red Operacional o Red IP Multimedia de Explotación Ferroviaria:

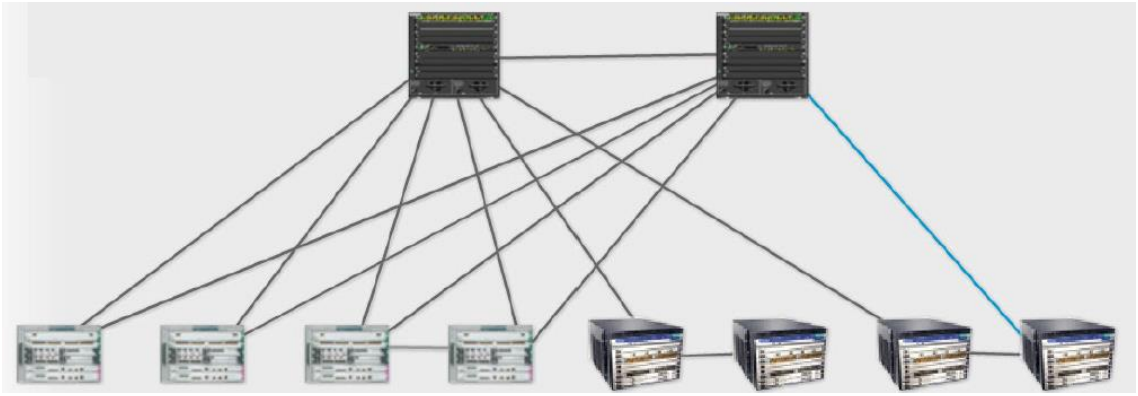
- Dispositivos con acceso a una única VPN
- Dispositivos con acceso a varias VPNs

Se entiende por Accesos Externos aquellas conexiones que provienen de dispositivos conectados a redes distintas de la Red Operacional o Red IP Multimedia de Explotación Ferroviaria, como la red IP corporativa (Intranet) o Internet:

- Acceso VPN vía Internet: para teletrabajadores y tecnólogos (soporte).
- Acceso Red Corporativa: para trabajadores conectados a la Red Corporativa.

En las redes de comunicaciones más avanzadas de Alta Velocidad, el despliegue de los servicios de datos administrativos se hace sobre una red 10GB-MPLS-IP, y los servicios de datos operacionales sobre una red SDH-MPLS-IP, con sus respectivos centros de datos (data center) para la gestión y control diferenciados. Ambas redes deben conectarse a través de elementos seguros (entre otros, cortafuegos o firewalls) para proveer el acceso a servicios del personal y dispositivos autorizados.

En el caso de redes metropolitanas, son de tipo IP (a veces sobre MPLS) y la topología más utilizada es un anillo para cada línea de cercanías, que cierra sobre dos nodos principales conectados directamente. En el caso de redes regionales, también de tipo IP, la topología más utilizada es la estrella replicada con dos nodos centrales unidos directamente, que se conectan con enlaces independientes a los nodos regionales. Al tratarse de la que puede afectar a nuestro tipo de líneas, vamos a incluir un esquema de ejemplo.



31 - Ejemplo de topología de red IP en redes regionales ferroviarias

A nivel técnico (véase la referencia para entrar en detalle), partiremos de la definición que hace CISCO de las redes MPLS [30]. Con ello es suficiente para entender la magnitud necesaria para evaluarlo como alternativa en nuestro trabajo.

Se trata de una tecnología de reenvío de paquetes que utiliza etiquetas para tomar decisiones relativas al reenvío de datos. Con MPLS, el análisis de encabezado de capa 3 se hace una vez sola (cuando el paquete ingresa al dominio de MPLS). La inspección de las etiquetas genera el posterior reenvío de los paquetes. MPLS ofrece estas aplicaciones beneficiosas:

- Redes privadas virtuales (VPN)
- Ingeniería de tráfico (TE)
- Quality of Service (QoS)
- Cualquier transporte por MPLS (AToM)

Además, disminuye el desbordamiento de reenvío en los enrutadores principales. Las tecnologías MPLS se pueden aplicar en cualquier protocolo de capa de red.

2.5.2 Comunicaciones Móviles

Actualmente, en la RFIG española existen 2 sistemas en uso para la comunicación radio entre el tren y el Puesto de Mando desde donde se controla la circulación de trenes. Se trata del sistema Tren-Tierra y del sistema GSM-R, que, por ser el eje tecnológico del trabajo, se explicarán a continuación con más detalle que los puntos vistos hasta ahora:

- Tren-Tierra

El sistema establece un enlace radiotelefónico, entre un puesto central y cualquier tren a lo largo de todo un trayecto incluso dentro de los túneles. El enlace se realiza entre el puesto central y los puestos fijos, a través de cable telefónico, y de estos con las unidades móviles, a través de ondas de radio en UHF [31].

El problema de comunicación en los túneles se ha resuelto mediante el tendido de cable radiante, que recibe y transmite en toda su longitud señales de radio igual que una antena.

El Tren-Tierra está compuesto de puntos de emisión y recepción de mensajes ubicados en:

- El Puesto Central de Radio (PCR).
- Los Puestos Móviles de Radio embarcados (PMR).
- Los Puestos Portátiles de Radio del personal de operación y mantenimiento (PPR).

A estos dispositivos los complementan las antenas emisoras y receptoras en los Puestos Fijos de Radio (PFR) repartidos a lo largo de todas las líneas para garantizar que el tren jamás pierda cobertura. Las antenas están conectadas por cable entre sí y con los puestos centrales, de tal manera que no todas las comunicaciones precisan de radio.

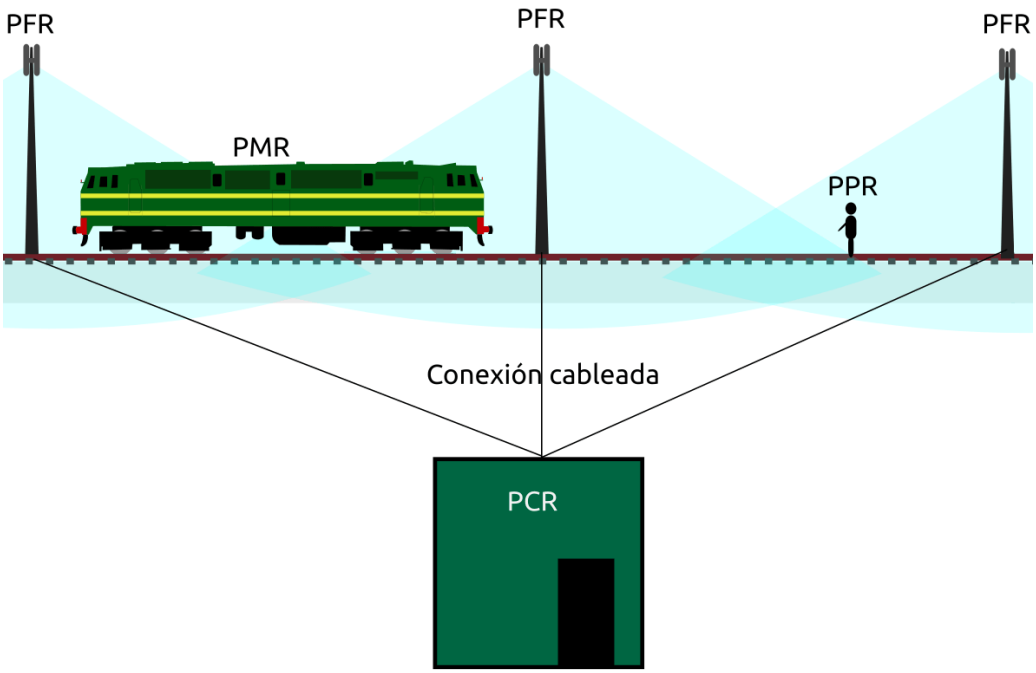
Las funcionalidades principales del sistema Tren-Tierra son las siguientes:

- Llamadas Selectiva, General y de Emergencia a los puestos fijos con identificación del tren.
- Llamadas de megafonía.
- Llamada selectiva con transmisión de mensajes codificados.
- Llamada selectiva a terminales móviles.
- Grabación en el CTC (Puesto central).

Sin embargo, presenta los siguientes inconvenientes:

- Baja capacidad para cursar llamadas.
- Espectro limitado. Plan de frecuencias crítico.
- No existe capacidad adicional para la ampliación del espectro.
- Baja calidad, limitaciones intrínsecas para comunicaciones de datos eficientes.
- Mínima privacidad.
- Protección inadecuada y mecanismos pobres para la prevención del fraude.

El puesto central, emite a través de los puestos fijos con tres frecuencias consecutivas que el móvil explora automáticamente. En la otra dirección los puestos fijos, seleccionan la señal útil más adecuada. Todas las llamadas quedan registradas en el puesto central por orden cronológico. Ante cualquier emergencia se puede transmitir y ejecutar avisos y ordenes individualmente para cada tren, o si se desea se pueden dar instrucciones generales, que afecten a todos los trenes que se encuentren en el recorrido.



32 - Esquema de conexiones del sistema Tren-Tierra

Toda comunicación se inicia mediante el envío de un mensaje codificado, que asegura la fluidez de las transmisiones y posibilita la interlocución selectiva sin perturbar el resto del servicio. Todo el proceso de exploración, sintonización y conmutación se realiza automáticamente sin intervención humana. El Puesto Central puede dar información directamente a los viajeros a través de la propia megafonía del tren. Este sistema de alta tecnología lo constituyen equipos de gran fiabilidad, ello permite optimizar la explotación ferroviaria, a la vez que colabora en aumentar la seguridad en el tráfico de la red.

La red fija está formada por los puestos fijos o estaciones de radio colocados a lo largo de la vía, y que actualmente suman unas 2.400 unidades

aproximadamente. El objetivo final es garantizar la cobertura total en el 95 por ciento del espacio y el tiempo. Por ello, la cifra total viene determinada por las particularidades de la orografía y del terreno que atraviesa la infraestructura ferroviaria, definiéndose mediante análisis radioeléctricos los lugares en los que deben situarse los puestos o estaciones.

Actualmente son 7.363 los kilómetros de red ferroviaria dotados de este sistema, al tiempo que están en ejecución otros 618 más. Las últimas inversiones en este ámbito van ligadas a las peticiones concretas de las Unidades de Negocio operadoras y a las actuaciones de modernización de infraestructuras del Ministerio de Fomento.

A lo largo de la Banda de Regulación se hallan escalonados los Puestos Fijos. En la vía de línea, hacia los Puestos fijos siguientes, son prácticamente repetidores de frecuencia vocal. En cada Puesto fijo la comunicación es a 4 hilos y se bifurca además hacia un transceptor UHF en FM / 25KHz en dúplex, emitiendo de forma constante a una potencia de 6 watios.

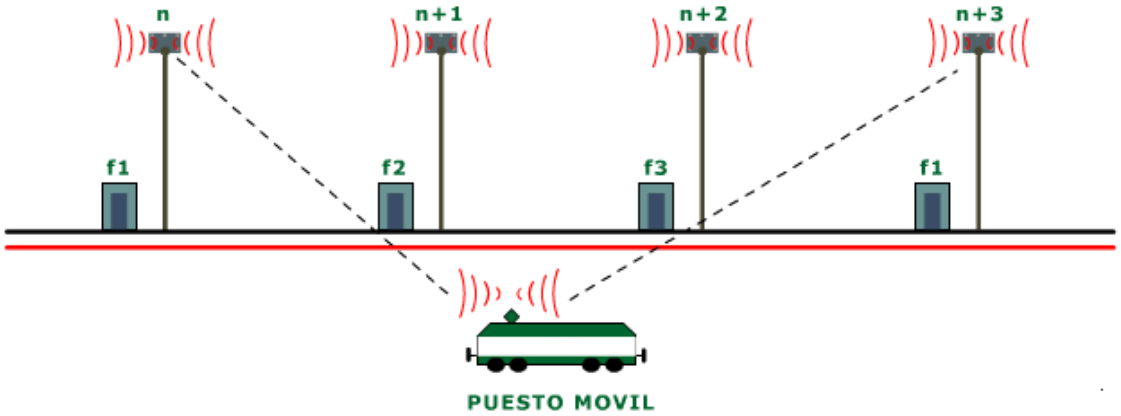
La conmutación se produce cuando la relación Señal / Ruido en una de las vías ha bajado con respecto a un umbral predeterminado y existe a su vez otra señal con mejor S/R. Por tanto, podemos apreciar que todo puesto fijo enlaza con el siguiente a través de un enlace radio y a través de un cable de tipo cuadrete con sección 0,91 cm o cable de pares del tipo 1,3 cm, cargado o descargado.

La salida hacia la antena es a través de un cable coaxial de ½'' con resistencia de 50 ohm, y la antena puede ser de dos tipos:

- Antena *Yagi*: Se utilizan en la mayoría de los puestos fijos.
- Antena *Helicoidal*: Tienen un lóbulo de radiación mucho más direccional que las anteriores y sirven para dar coberturas a zonas de orografía complicada, ya sea un túnel o una zona de sombra.

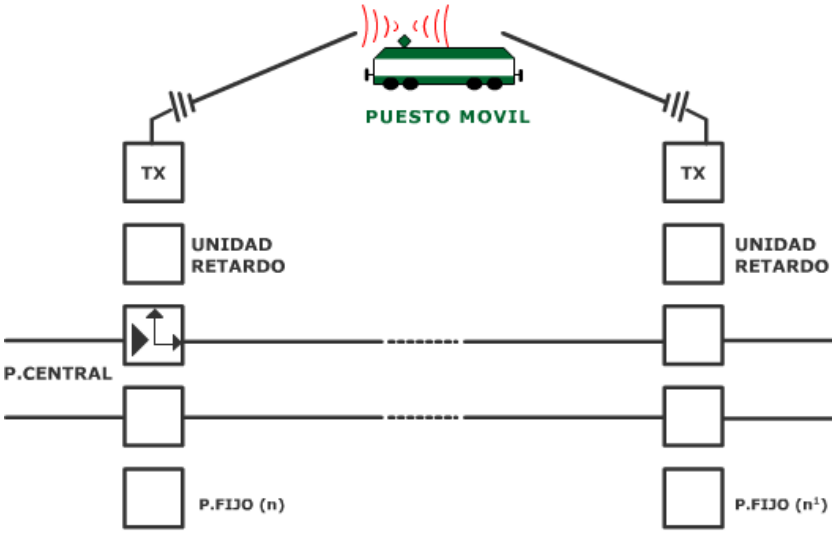
Hay disponibles varios sistemas de emisión, entre los principales se encuentran los siguientes:

- Emisión alternada o cuadrifrecuencia: permite a los puestos fijos trabajar con tres frecuencias posibles de emisión separadas cada una de ellas 50 KHz entre si y designadas como f1, f2 y f3, cuyos valores son para f1:448.550 KHz, f2:448.600 KHz y f3:448.650 KHz. Cuando a lo largo de la línea se alternan cíclicamente las frecuencias f1,f2 y f3 entre puestos fijos consecutivos obtienen la configuración cuadrifrecuencia pura.



33 - Esquema de emisión alternada

- Emisión isofrecuencia: cuando se admite que en determinados tramos el Puesto Móvil puede recibir señales de dos o más Puestos Fijos que trabajan con la misma frecuencia con niveles relativos lo suficientemente próximos para que no se cumpla el requisito anteriormente mencionado, se obtiene una situación de Emisión en isofrecuencia, o de sobre-alcance. Cuando dos estaciones consecutivas trabajan en la misma frecuencia de emisión se obtiene una diada en isofrecuencia. Cuando son tres las estaciones consecutivas a la misma frecuencia, se tiene una triada en isofrecuencia, en cuyo caso los dos puestos fijos más próximos al puesto central se equipan con una unidad de retardo.



34 - Esquema de emisión isofrecuencia

- Puesto fijo como repetidor: por medio de telegramas procedentes del Puesto Central, los puestos Fijos pueden quedar segregados de la red Tren-Tierra, para actuar como repetidores de radio con portátiles que se encuentren dentro de la zona de cobertura. No obstante, al seguir el resto de la Banda de Regulación proporcionando el servicio Tren-Tierra, el Puesto Fijo configurado en modo repetidor permite el paso de las señales en línea tanto en el par de emisión como en el de recepción.

El sistema Tren-Tierra está dotado de un sistema de supervisión que permite la exploración de los Puestos Fijos conectados a las bandas de regulación atendidas por el Puesto Central. La exploración permite detectar las averías más importantes (alarmas) que se pueden producir en los puestos fijos. El sistema de supervisión se desarrolla mediante tres funciones básicas:

- Diálogo por medio de telegramas entre el Puesto central y el Puesto Fijo, a través de los cuales el Puesto Central obtiene de los Puestos Fijos la información necesaria.
- Proceso de medida, dentro de cada Puesto Fijo, del estado de las alarmas que se han de enviar al Puesto Central.
- Visualización de la información recogida en la pantalla correspondiente del Puesto Central en el display del Puesto Fijo.

El formato de los telegramas está compuesto, en cuanto a su estructura, por los siguientes datos:

- Dos bytes de sincronismo.
- Cuatro bytes de información.
- Un byte de CRC (código de redundancia cíclica) para seguridad de los datos.

La supervisión está controlada en el Puesto Fijo por un programa que se encarga de realizar medidas de ciertos parámetros, recibir órdenes procedentes del puesto Central y enviar los resultados. El proceso se desarrolla de forma que nunca interfiera con la operación propia del Puesto Fijo.

En su condición de reposo, el programa está atento a la recepción de un telegrama de supervisión procedente del Puesto Central. Si se recibe un comando de bucle se realizan, utilizando el tono de bucle de 1.300 Hz, procedente del Puesto Central y otro de 10 MHz generado internamente, las medidas siguientes:

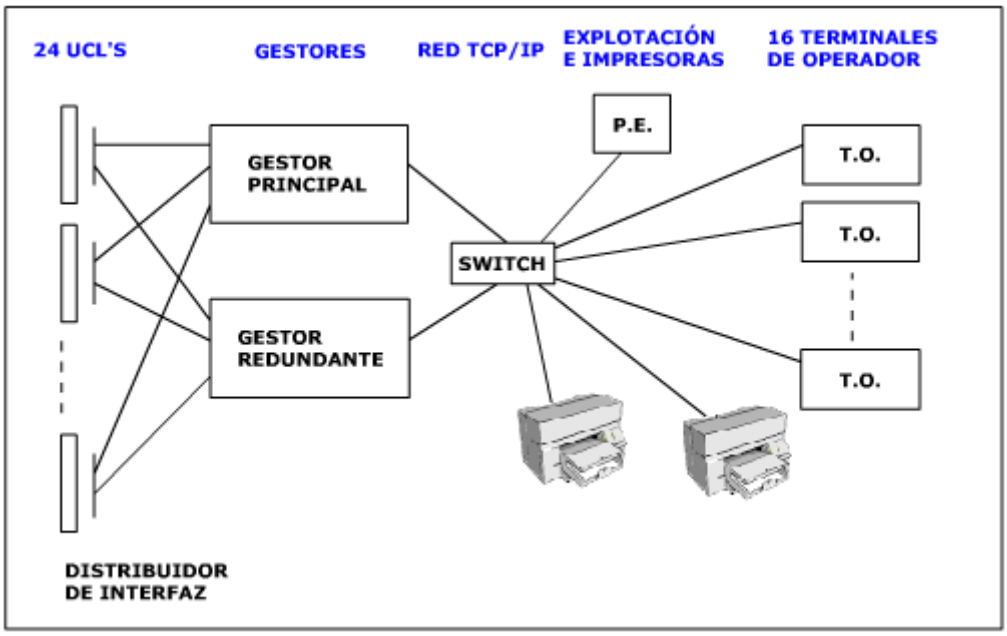
- Nivel de señal a línea hacia el Puesto Fijo siguiente (par de emisión).
- Nivel de señal de salida del receptor.
- Ruido propio del transceptor.

Si alguna de estas medidas está fuera de los límites establecidos se indica en la memoria de alarmas del Puesto Fijo, además si el Puesto Fijo es de Bifurcación o es el último de la Banda de Regulación (o de un ramal, si hay bifurcación), inyecta por el par de recepción un tono de 1.300 Hz durante 400 milisegundos con el fin de que los Puestos Fijos anteriormente midan su par de recepción. Si el telegrama que se recibe es de interrogación y va dirigido a este Puesto Fijo, se envía un telegrama de respuesta con el estado de las alarmas.

En el Puesto Central, el subsistema de comunicación equipa, primeramente, los circuitos analógicos necesarios para la adaptación e igualación de los niveles de baja frecuencia de las líneas de 4 hilos provenientes de los Puestos Fijos de cada banda de regulación, funciones realizadas por la Unidad Adaptadora de Líneas (UAL) y la Unidad Distribuidora de Líneas (UDL). Las líneas Tren Tierra así tratadas son recibidas por las Unidad de Control de Líneas (UCL), que son las cabeceras de las líneas de cada Banda de

Regulación. En ella reside la circuitería analógica y digital, así como el software necesario para la realización de todas las funciones Tren Tierra, bajo el control del Sistema de Gestión, con los que comunican por medio de enlaces RS 232.

El control del sistema de comunicación Tren-Tierra se realiza por medio de dos gestores, uno de los cuales actúa como gestor principal y el otro como redundante. En la instalación de referencia, se configurarán 24 bandas de regulación conectadas a los gestores mediante puerto serie RS-232, 16 terminales de operador interconectados entre sí y con los gestores, mediante una red TCP/IP 10/100 Base-T.



35 - Esquema del sistema de control del Tren-Tierra

Los responsables de Telecomunicaciones Ferroviarias indican que el desarrollo del Tren-tierra llega a su punto final: ha demostrado ser un sistema ágil, robusto y eficaz, pero con importantes limitaciones sobre todo desde el punto de vista tecnológico, de cara a las nuevas necesidades de la explotación ferroviaria.

- GSM-R

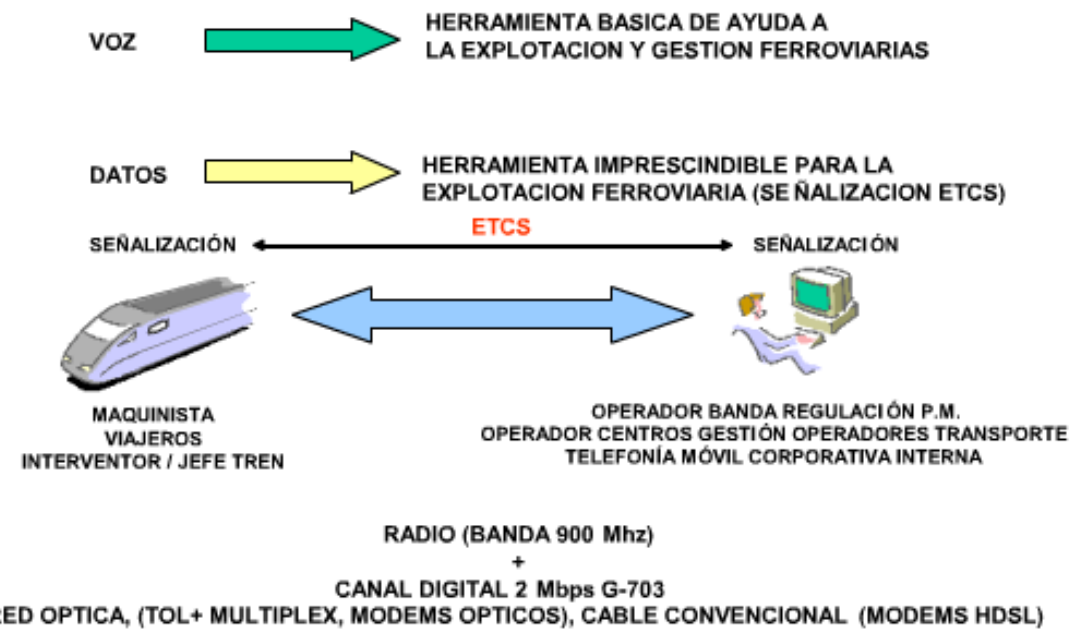
Todo comenzó en 1992 cuando las organizaciones miembros de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC, Union Internationale des Chemins de Fer), comenzaron a trabajar en una nueva especificación: EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network) que define un sistema de radio capaz de atender las necesidades de comunicación móvil de los ferrocarriles europeos [32].

El grupo EIRENE se ha encargado de desarrollar la especificación, en colaboración con el ETSI (Instituto Europeo de Normalización de las Telecomunicaciones) y el consorcio MORANE (MObile RAdio for railway Networks in Europe).

MORANE es un consorcio de compañías ferroviarias, fabricantes, proveedores y organizaciones de investigación que han venido trabajando en el desarrollo de una red de comunicaciones basada en el estándar GSM destinada a las compañías de ferrocarriles y en concreto a los maquinistas, controladores de zona y equipos de mantenimiento. El objetivo global del proyecto MORANE consiste en especificar, desarrollar, probar y validar prototipos de este nuevo sistema de radio que resuelvan todas las necesidades de las compañías ferroviarias.

El GSM-R ofrece soporte a los siguientes servicios:

- Radiotelefonía móvil general.
- Radiotelefonía móvil para labores de maniobra y mantenimiento.
- Radiotelefonía móvil para vigilancia y seguridad.
- Radiotelefonía móvil de gestión y **otros usos**.



36 - Relación de funciones del sistema GSM-R

En la comparativa del sistema analógico Tren-Tierra frente al sistema de telefonía móvil digital GSM-R, vemos que éste aporta las siguientes prestaciones principales:

- Transmisión de datos Vitales- ETCS.
- Transmisión de datos no vitales.
- SMS's.
- Datos para los usuarios: registro de FN...
- Comunicaciones vocales seguras.
- Direccionamiento dependiente de la localización LDA.
- Direccionamiento Funcional FN.

- Llamadas de emergencia ferroviaria.
- Llamadas de Difusión.
- Establecimiento de Grupos de llamada.
- Comunicaciones de datos seguras.
- Transmisión de Mensajes.
- Transmisión de datos de usuario.

El GSM-R está basado íntegramente en el estándar GSM, pero sigue habiendo muchas aplicaciones específicas de los ferrocarriles que obligan a introducir mejoras y modificaciones considerables en la tecnología GSM actual, si se pretende implantarlas y mantener una elevada calidad de servicio en las comunicaciones en trenes de alta velocidad.

La explotación ferroviaria y la respuesta frente a situaciones de emergencia plantean grandes exigencias en términos de fiabilidad, que obligan a incorporar medidas de redundancia y disponibilidad adicionales en un estándar de red ya de por si fiable como es el propio GSM. Estas necesidades adicionales se resumen en las siguientes:

- Una red profesional
    - Infraestructura de red propia (plan de marcación, etc...).
    - Aplicaciones especializadas: Maniobras, control de trenes (ATC).
    - Datos continuos.
    - Eficiencia operativa.
- Operaciones seguras
    - Alta fiabilidad.
    - Situaciones de emergencia (establecimiento de llamada rápido).
- Trabajo en equipo
    - Comunicaciones en grupo.
- Interoperabilidad
    - Migración gradual desde las infraestructuras de comunicaciones existentes.
    - Redes de comunicación ferroviaria internacionales.
    - Redes de comunicación públicas.

Los servicios GSM-R estandarizados por ETSI dentro de la Fase 2+ de GSM se denominan conjuntamente ASCI (Advanced Speech Call Items). ASCI engloba los tres servicios siguientes:

- eMLPP (enhanced Multi-Level Precedence and Preemption), que permite la apropiación forzosa de recursos para llamadas prioritarias.
- VBS (Voice Broadcast Service) que permite realizar llamadas de broadcast o difusión.
- VGCS (Voice Group Cell Service) que permite a varios grupos y usuarios realizar llamadas a otros miembros del mismo grupo o de otro diferente.

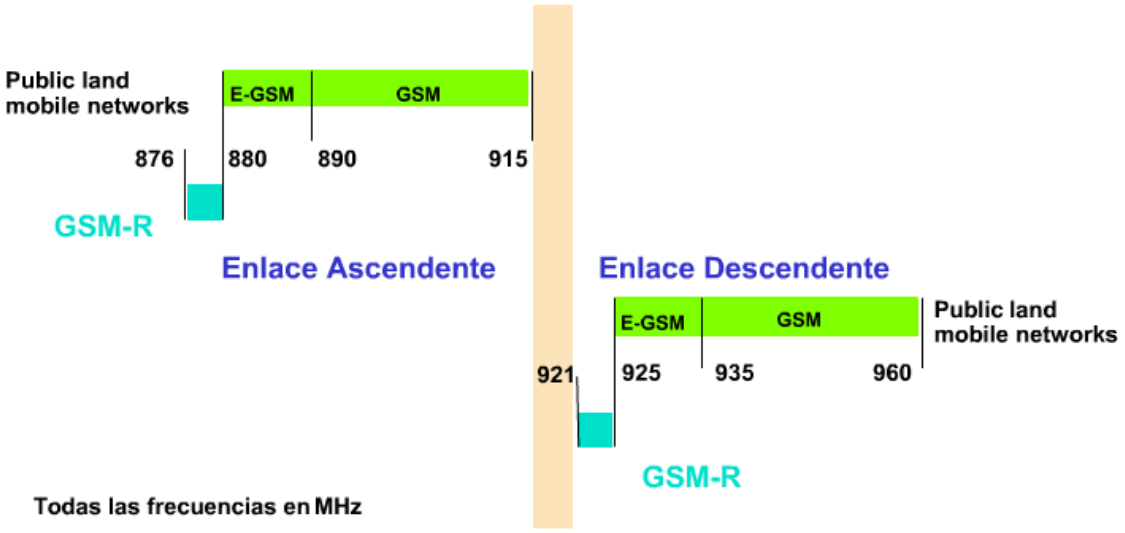
Y estos son los aspectos concretos relacionados con la explotación ferroviaria:

- Numeración funcional: permite contactar con un usuario o una aplicación concreta por medio de un número que identifica la función asociada y no el terminal físico. Además, se permite presentar información visual sobre el emisor o el receptor de la llamada (presentación de número funcionales).
- Matriz de accesos: permite validad las capacidades de acceso para las comunicaciones entre distinto usuarios y grupos de usuarios.
- Numeración por localización: permite encaminar las llamadas de un móvil al controlador adecuado, por ejemplo, el asociado a la zona geográfica donde se encuentre el usuario.
- Llamadas de prioridad: registra todas las incidencias marcadas como llamadas de alta prioridad.

Los nuevos servicios potenciales a bordo del tren se pueden ver en la figura siguiente:

37 - Potenciales servicios del sistema GSM-R

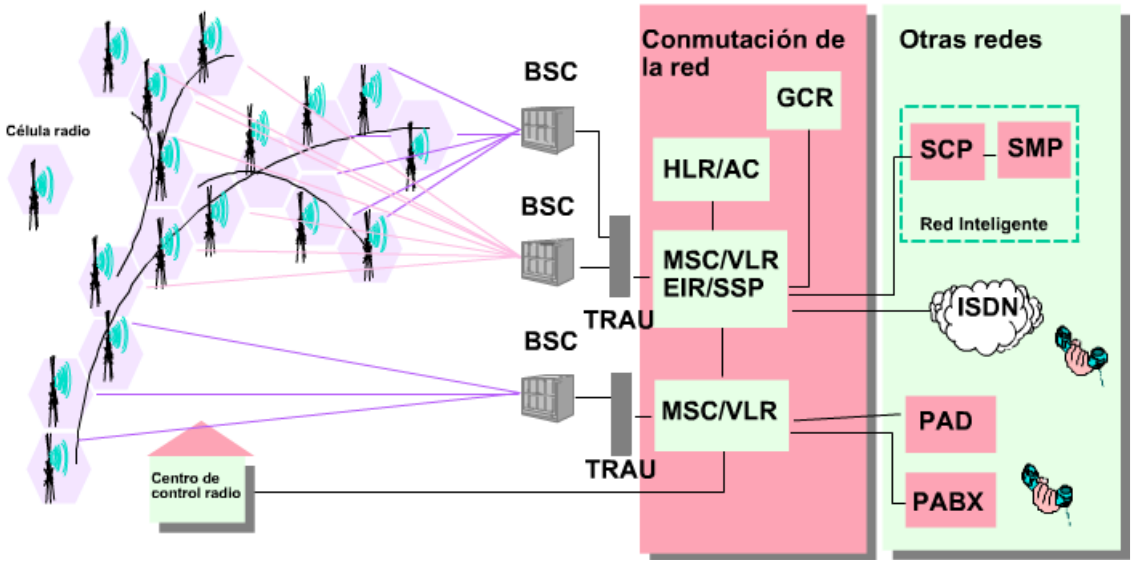
El GSM-R, se diferencia del GSM por las frecuencias que utiliza (876-880 MHz y 921- 925 MHz) y ciertas funciones avanzadas, para el intercambio de informaciones de voz y datos entre los trenes y la tierra. Está previsto que también pueda utilizarse para aplicaciones de comunicaciones de los viajeros.



38 - Banda de frecuencias del Sistema GSM-R

Los elementos que componen la red serían los siguientes, muy similares a los de una red GSM:

- BSC: Controlan grupos de BTS y administran frecuencias y recursos de radio.
- TRAU: Provee adaptación de velocidades.
- HLR: Base de datos de todos los usuarios del sistema: dar de alta, eliminar, "prohibición" de llamadas…
- AC: Centro de autentificación. Se chequea a cada usuario, pidiendo el IMSI y los algoritmos de autentificación.
- MSC: Enruta llamadas y provee y gestiona los servicios suplementarios.
- VLR: Registro de visitantes, "réplica" de los usuarios en el HLR para una zona en concreto. Si se cambia de MSC, se cambia de VLR, pero no de HLR.
- SSP: Interfaz con la plataforma de Red Inteligente.
- GCR (Group Call Register): Para llamadas de grupo/difusión. El identificador del grupo llega a este registro y comprueba las celdas asociadas donde lanzar la llamada.



39 - Elementos particulares de una red GSM-R

La industria ha decidido apoyar a los sistemas GSM-R hasta 2030, aunque eso no significa que no se vayan a producir cambios hasta entonces. De hecho, lo que sucederá es que este sistema seguirá funcionando incluso cuando se desarrolle una tecnología sustitutiva, lo que podrá crear ciertas incompatibilidades en las redes [33].

Uno de los principales retos del sistema GSM-R es solucionar las interferencias que se crean con las redes públicas 3G y 4G, que están sustituyendo al GSM en la banda de 900MHz. Y es que, cuando los transmisores de las redes móviles públicas se sitúan cerca del ferrocarril y el GSM-R está más lejos, la transmisión se bloquea irremediablemente.

Cuando las redes públicas funcionaban con GSM, las interferencias se resolvían mediante la coordinación (cambiando de canal, por ejemplo), pero con la llegada del 3G y 4G, ya no se puede hacer así. Por eso, se ha elaborado una lista con las posibles soluciones al problema:

- Mejorar los transmisores de la red pública con la incorporación de filtros que reduzcan las interferencias.
- Aumentar la potencia de las estaciones base de GSM-R o el número de ellas (aunque es una solución cara y no siempre práctica).
- Mejorar los receptores móviles de los trenes con mejores antenas (esto podría no solucionar totalmente el problema).
- Incorporar filtros internos o externos en el tren, lo que resolvería el problema, pero es costoso y generaría otros inconvenientes secundarios.
- Cambiar el receptor móvil de los trenes o, cuando fuese suficiente, la unidad de radio.

3 Desarrollo de la modernización de una línea ferroviaria abandonada

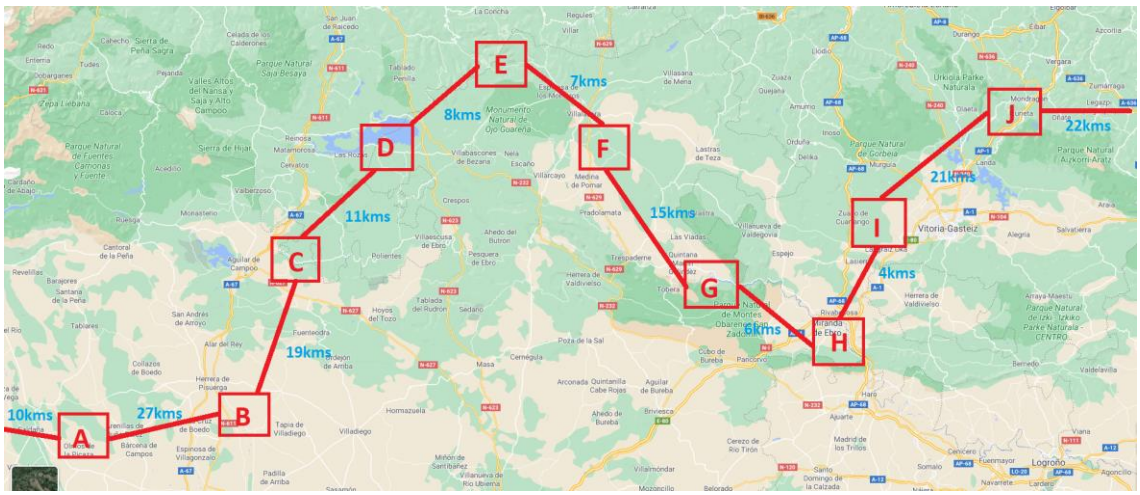
Tras haber visto el estado del arte en la técnica de las mercancías ferroviarias y los sistemas de señalización y telecomunicaciones, para dar una solución al problema de cómo equipar una línea abandonada, debemos proponer una concreta para poder cuantificar cuánto costaría renovarla y estudiar su viabilidad.

3.1 Presentación de la línea

Podemos tomar como ejemplo las líneas ferroviarias abandonadas que se proponen en las referencias [34] y [35]. Hay muchas de este tipo por todo el estado, pero éstas son buen ejemplo. Ambas fueron abandonadas por la Administración y se encuentran actualmente vandalizadas, por lo que sus instalaciones de señalización y telecomunicaciones no son válidas. En ambos casos también, hay proyecciones de reapertura en el futuro por parte del Gobierno [36].

Es cierto que cada línea tendrá sus peculiaridades, por lo que se propone en este ejercicio tomar una línea hipotética, con ciertas asunciones (que veremos en el capítulo siguiente).

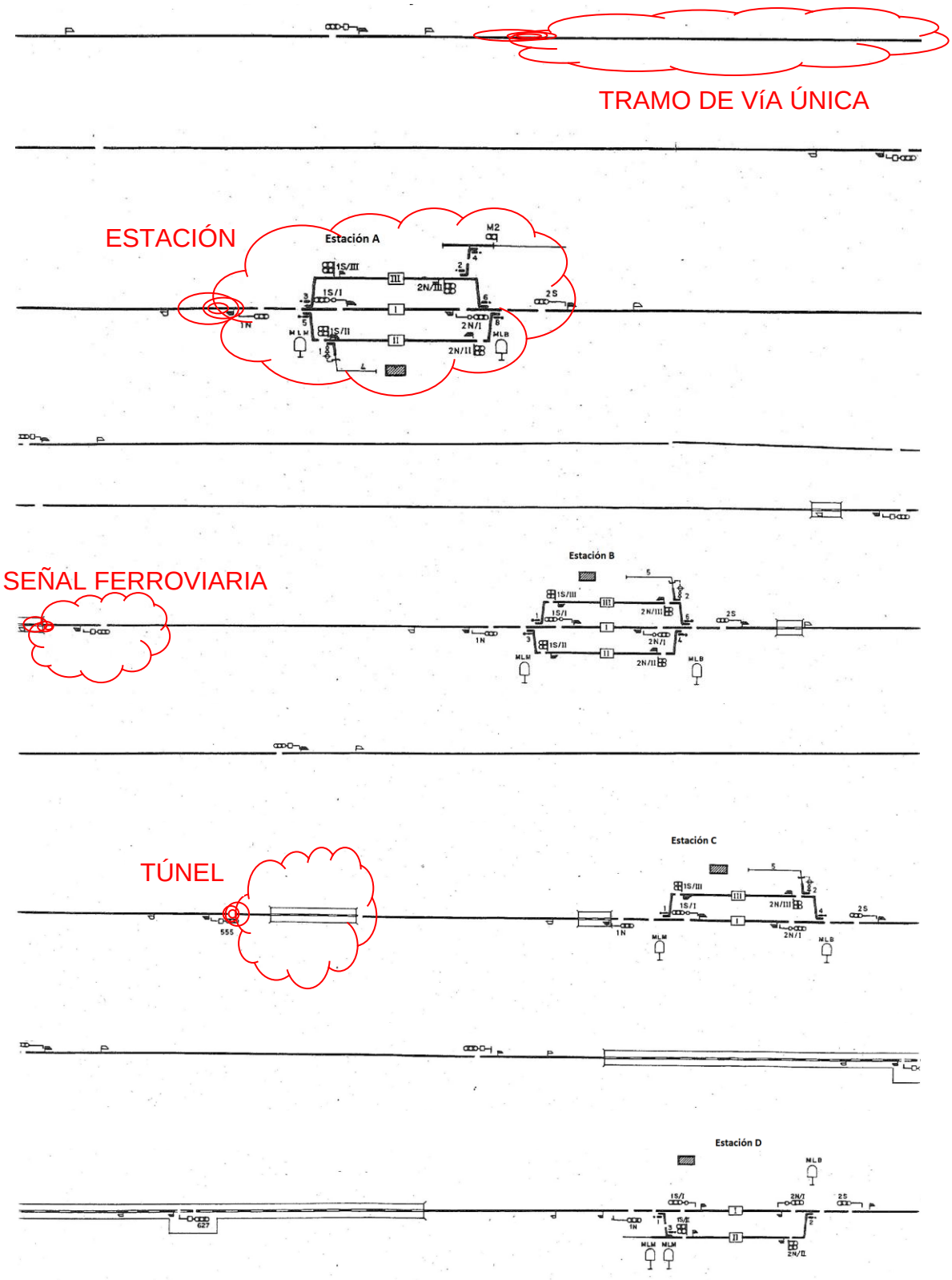
Vamos a hacer un ejercicio en el que supondremos un tramo de vía única de 150 kms con 10 estaciones al que vamos a dotar de los sistemas vistos anteriormente. Conceptualmente, el tramo a renovar es el siguiente, en el que llamaremos a las estaciones por nombres ficticios identificados por letras (cada recuadro corresponde a una estación y la línea roja, al tramo de vía única).

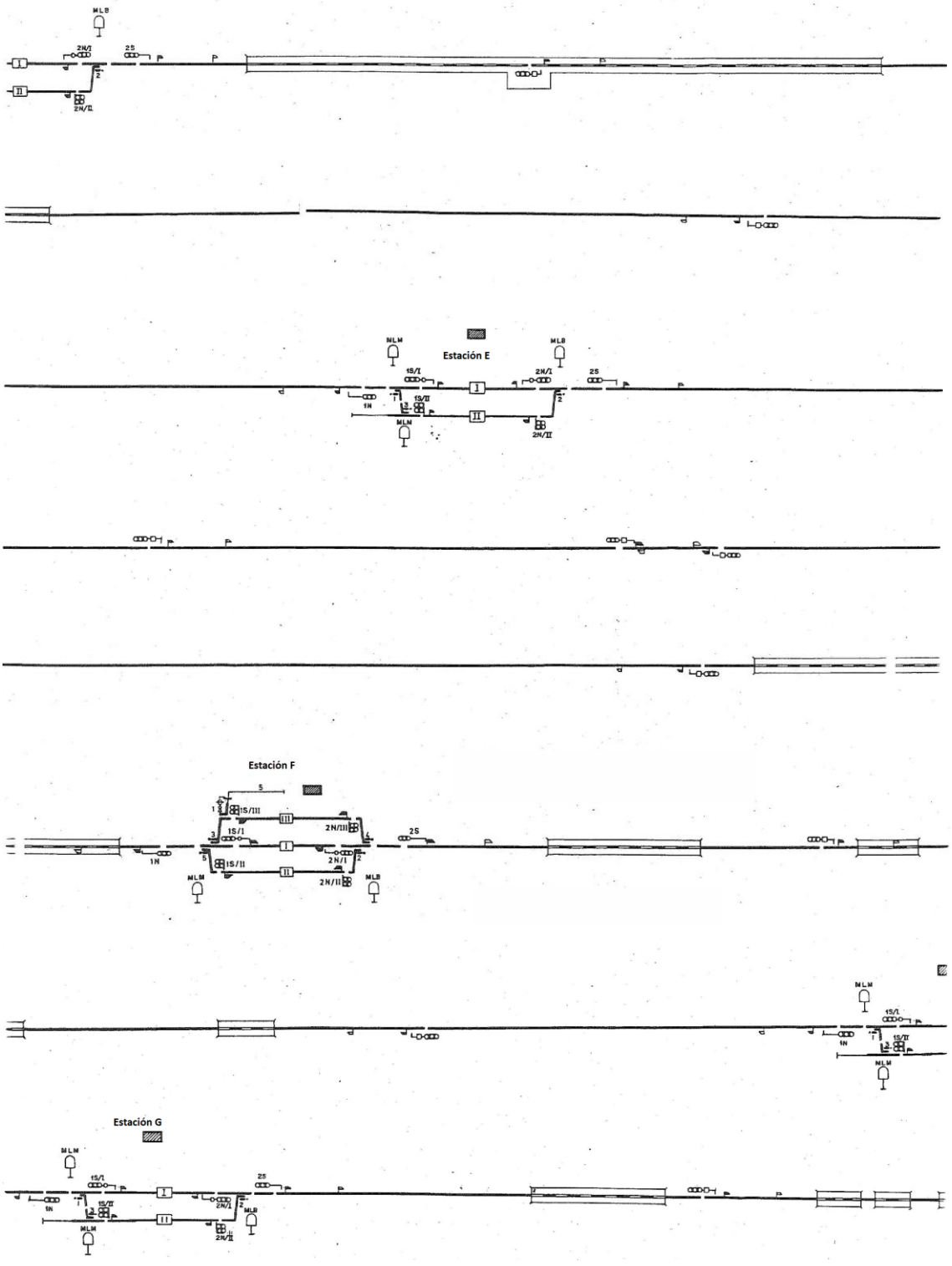


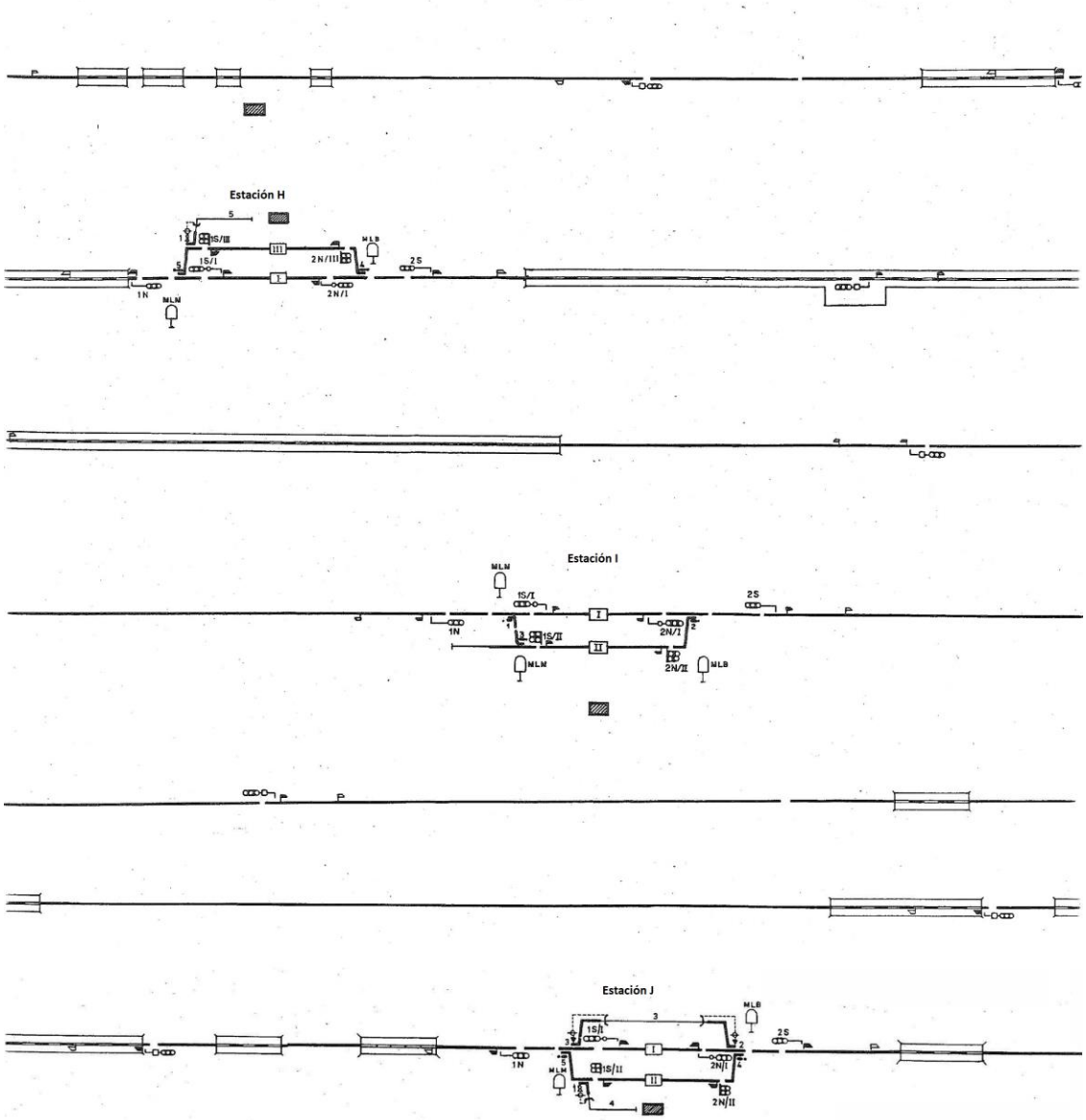
40 - Esquema conceptual de la línea a renovar

No obstante, para realizar el dimensionamiento, proponemos tomar una tira de vía real para ver las instalaciones necesarias en este tipo de líneas ferroviarias. A continuación, se puede ver el esquema de vías y el cantonamiento que tomaremos de ejemplo para ello. En él podemos distinguir las estaciones

nombradas con letras, la vía única, que corresponde con la línea negra que se corta y continúa debajo y las señales existentes.




Estación E
Estación F
Estación G



41 - Tira de vía de la línea a renovar

Como se puede ver entre el esquema conceptual y la tira de vía anterior, se trata de una línea ferroviaria con 10 estaciones, más las 2 colaterales (en servicio, que no aparecen en el plano), en las que deberemos actuar.

Se trata de una línea con vía única, cantonada entre estaciones, con bloqueos en vía única a automatizar, con 28 desvíos, con 86 señales dependientes de enclavamiento y otras 40 (no aparecen en el plano) en funcionamiento descentralizado y dependientes únicamente del circuito de vía y la señal siguiente.

Son unos 150 kilómetros donde 95 están centralizados (figuran en el plano) y los otros 55 están descentralizados, sin enclavamiento. Vemos que tiene varios túneles cortos, a los que habrá que dar cobertura de radiocomunicaciones.

3.2 Estado actual de la línea

Por norma general, se trata de líneas sin electrificar, sin catenaria, con ancho de vía ibérico (1.668mm entre carriles) o métrico (1.000mm entre carriles), pero en ningún caso UIC (1.443mm entre carriles). Las líneas no suelen presentar problemas de obra civil importantes, ya que han estado en uso y están dentro de la vida útil estimada para la infraestructura (unos 100 años).

En nuestro trabajo, asumiremos que la línea se abandonó por la Administración a finales del siglo pasado, por lo que la tecnología es ya obsoleta y, en cualquier caso, ha sido mayoritariamente vandalizada. Podemos ver un ejemplo de equipos vandalizados en este tipo de líneas en las imágenes siguientes:

42 - Instalaciones ferroviarias vandalizadas

Vamos a suponer la siguiente situación, muy probable en líneas de este tipo:

- La línea a renovar está equipada actualmente con enclavamientos tipo bouré (mecánicos) en las estaciones B, C, D, E, F, G, H e I, y enclavamientos eléctricos en A y J, las más grandes.

- La explotación, antes de su abandono, se realizaba mediante bloqueo telefónico, al amparo de lo estipulado para este tipo de bloqueo en el Reglamento de Circulación Ferroviaria.

- No existe sistema de detección del tren en todo el trayecto, excepto en las estaciones A (circuitos de vía de audiofrecuencia) y J (contadores de ejes).

- Las señales son mecánicas en las estaciones en las estaciones B, C, D, E, F, G, H e I. En A y J existen señales laterales luminosas de focos incandescentes, pero se encuentran totalmente vandalizadas.

- El sistema de protección ASFA analógico está presente en las estaciones A y J, así como en las señales de protección de los pasos a nivel automáticos de todo el trayecto.

Sirva la siguiente tabla para resumir las suposiciones anteriores, antes de seguir:

Estación	Enclavamiento	Tipo de bloqueo	Detección de tren	Tipo de señales	Protección de tren
A	Eléctrico	Telefónico	CdV	Luminosas	ASFA analógico
B	Mecánico	Telefónico	-	Mecánicas	-

Estación	Enclavamiento	Tipo de bloqueo	Detección de tren	Tipo de señales	Protección de tren
C	Mecánico	Telefónico	-	Mecánicas	-
D	Mecánico	Telefónico	-	Mecánicas	-
E	Mecánico	Telefónico	-	Mecánicas	-
F	Mecánico	Telefónico	-	Mecánicas	-
G	Mecánico	Telefónico	-	Mecánicas	-
H	Mecánico	Telefónico	-	Mecánicas	-
I	Mecánico	Telefónico	-	Mecánicas	-
J	Eléctrico	Telefónico	CdE	Luminosas	ASFA analógico

43 - Tabla resumen de características de las estaciones

- En todo el tramo del proyecto existen diferentes Pasos a Nivel con distintos niveles de protección. Sin embargo, no vamos a entrar en detalle, porque su análisis y necesidad no es esencial para la tarea que nos ocupa, por lo que no se prevé su actualización.

- A lo largo del trayecto existen algunos apeaderos sin servicio, que a todos los efectos se consideran plena vía pues ha desaparecido totalmente su funcionalidad hoy en día, aunque se mantengan los antiguos andenes.

- Las comunicaciones entre estaciones se realizan actualmente a través de un cable aéreo de 5 cuadretes, disponiendo en cada estación de pupitre para la telefonía de explotación. Si bien, parte del cable ha sido robado.

- No existe sistema de comunicaciones móviles para las circulaciones en trayecto, aunque en las estaciones A y J sí disponen de una emisora (puesto móvil radio) de Tren-Tierra funcionando en modo “C” para poder comunicarse con los trenes en las inmediaciones de la estación (desde las señales avanzadas de cada estación).

- El suministro de energía se realiza a través de las acometidas locales de cada estación, ya que no hay catenaria ni línea de alimentación en tensión continua.

- Respecto a la red de zanjas y canalizaciones, existen algunas canalizaciones en ciertas estaciones, pero se consideran no aprovechables para las necesidades de tendido de cables de la renovación, dada su saturación y estado. En trayecto no existen canalizaciones ni zanjas, a excepción de las asociadas a la señalización de los pasos a nivel que cuentan con sistema de protección, pero que en todo caso no son aprovechables para la renovación.

- Los accionamientos de los desvíos están en mal estado en todos los casos, cuando no han sido sustraídos o vandalizados.

- No existía control centralizado (CTC), dado que se explotaba en régimen local por el jefe de estación.

Como vemos, se trata de una línea, como muchas otras existentes en la RFIG, que se han quedado obsoletas y no permiten, en su estado actual, la circulación de trenes modernos. Por lo tanto, deducimos que, para llevar a cabo nuestro propósito, deberemos poner en servicio de nuevo la línea con nuevas instalaciones y después dotarla de un sistema que permita la trazabilidad de las mercancías.

3.3 Instalaciones y renovaciones propuestas

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se describen a continuación los sistemas contemplados y la solución tecnológica aplicada en los principales elementos susceptibles de alternativas, justificándose así la solución adoptada para las instalaciones objeto del proyecto.

3.3.1 Instalaciones de señalización

El alcance de la renovación comprendería los siguientes trabajos:

- Sustitución de los enclavamientos eléctricos existentes en A y J, así como de los enclavamientos bouré existentes en las estaciones B, C, D, E, F, G, H e I, por nuevos enclavamientos electrónicos de última generación, que aseguren el mantenimiento y las últimas funcionalidades de seguridad. No se justifica instalar otra cosa, dado que los propios fabricantes desaconsejan instalar equipos y tecnologías que no tienen soporte o que van a retirar pronto del mercado, como los grupos geográficos, los mecánicos o los enclavamientos eléctricos.

- Dotación de Bloqueo Automático en Vía Única (BAU) centralizado, en toda la línea, utilizando como soporte los nuevos enclavamientos electrónicos y como medio de transmisión de comunicaciones la nueva red de fibra óptica, sustituyendo con ello el actual bloqueo telefónico por cuadretes existente en la línea a renovar. Por seguridad, los bloqueos telefónicos se tiende a retirarlos, dado que se han provocado varios accidentes por esta tecnología [37], ya que dependen en parte del factor de circulación, con la consiguiente posibilidad de error humano.

- Integración de los nuevos enclavamientos electrónicos en los CTC existentes que cubran la zona geográfica. El control remoto de los sistemas de protección y detección de tren desde los Puestos de Mando o CTC permiten que un mismo factor de circulación puedan gestionar de forma centralizada más de una estación, por lo que, por motivos económicos, se deben preparar las renovaciones para que así pueda ser. De este modo se evita que en cada estación deba haber una persona dedicada a gestionar las circulaciones a su paso.

- Sustitución de los cuadros de mando local existentes por nuevos puestos de mando local con sistema videográfico portátil en todas las estaciones. Las mesas de control ya no son prácticas y presentan problemas de conservación y mantenimiento, como su actualización. Es por ello que resulta más práctica cambiarlo por sistemas informáticos portátiles. Así lo preveremos.

- Sistemas de ayuda al mantenimiento de los enclavamientos (SAM) en todas las estaciones, así como de un SAM central en un sitio remoto. Lo hacemos así porque, primero, es tendencia en la RFIG para estaciones modernas y porque el mantenimiento de estas líneas siempre estará gestionado en remoto, al no disponer de personal suficiente para ubicarlo en estaciones tan pequeñas.

- Registrador jurídico en cada uno de los nuevos enclavamientos. Obligatorio por normativa de ADIF, de cara a justificar en caso de accidente el estado de los equipos y las órdenes recibidas.

- Instalación de contadores de ejes en toda la línea, tanto en estaciones como en trayecto, de forma que se abarata el coste de renovarlo y se permite un cantonamiento más grande, como ya vimos en las ventajas de los capítulos de estado del arte.

- Instalación de nuevas señales, así como sustitución de las actuales en toda la línea, por nuevas señales modulares de tecnología LED, considerando que las actuales especificaciones técnicas de ADIF obligan a ello.

- Instalación de pantallas alfanuméricas, cartelones y pantallas fijas de información en toda la línea, donde corresponda, según la normativa del RCF.

- Instalación de accionamientos eléctricos para todos los desvíos motorizados conforme al esquema de explotación que hemos presupuesto anteriormente. Los accionamientos a contemplar serán de dos motores para los desvíos de vía general y de un motor para el resto de los desvíos. Con ello, garantizamos la operación segura de todos los desvíos y se minimizan las consecuencias del fallo de uno de ellos.

- Red de cables para las instalaciones de seguridad, que serán del tipo normalizado multiconductor o de cuadretes, de acuerdo con las características de los diferentes equipos a instalar.

3.3.2 Sistema de protección de tren

- Instalación de balizas del nuevo sistema ASFA Digital (Anuncio de Señales y Frenado Automático) en todas las señales nuevas. De esta

forma se elimina el antiguo ASFA analógico que suele haber en este tipo de líneas.

- Dado que, como veremos más adelante, vamos a instalar GSM-R, se prevé la instalación del sistema de protección de tren ERTMS/ETCS. Pero únicamente el de nivel 2, dejando la instalación del de nivel 1 como opcional, al no ser necesario estrictamente (en el presupuesto no lo tendremos en cuenta), con lo cual se abarata la solución. De este modo, podemos optar a declarar la línea como "interoperable", según los criterios europeos recogidos por la AESF [38].

3.3.3 Control de Tráfico Centralizado (CTC)

Se prevé la integración de los nuevos enclavamientos electrónicos en los CTC existentes en las estaciones provinciales de mayor tamaño (los suponemos existentes, ya que prácticamente toda la red está gestionada en remoto), contando con gestión dual entre ambos, de cara a poder llevar el control en uno o en otro CTC.

3.3.4 Telecomunicaciones Fijas

En telecomunicaciones fijas, los criterios de instalación están relacionados con la necesaria eliminación del cable existente que quede (normalmente en tendido aéreo), pasando a realizar todas las comunicaciones a través de los nuevos cables de fibra óptica a instalar. Las actividades previstas son las siguientes:

- Tendido de dos cables de fibra óptica soterrados, en toda la línea. Se tenderá un cable de 128 fibras ópticas (f.o.) por un lado de vía y otro cable de 32 f.o. por el lado contrario, de cara a dotar de redundancia física a la red de fibra óptica. El tendido de ambos cables se realizará en zanja en trayecto y en canalización en estaciones, incluyendo un monotubo de reserva para futuros usos.

- Segregaciones del cable de 128 f.o. en todos los puntos de acceso proyectados (edificios técnicos de señalización y pasos a nivel). Se incluirán también las segregaciones para las casetas de las BTS (GSM-R). Las segregaciones serán de 16 f.o. a realizar a todos estos puntos de acceso. El cabe de 32 f.o. entrará en punta únicamente en los edificios técnicos de señalización (enclavamientos en estaciones).

- Implementación de red IP-MPLS, incluyendo el equipamiento asociado a en las estaciones y casetas de las BTS (GSM-R).

- Instalación de equipos de acceso IP en las casetas de los pasos a nivel existentes en todo el trayecto. En los pasos a nivel dotados de semibarreras se instalará también un teléfono IP para el mando local.

3.3.1 Telecomunicaciones Móviles

La solución adoptada es la instalación de GSM-R en detrimento del Tren-Tierra por 2 motivos principales:

- Es la tecnología a la que los fabricantes están dando actualmente soporte, dejando como obsoleto el Tren-Tierra.
- Permite que la línea sea interoperable en los términos vistos en la referencia [38].

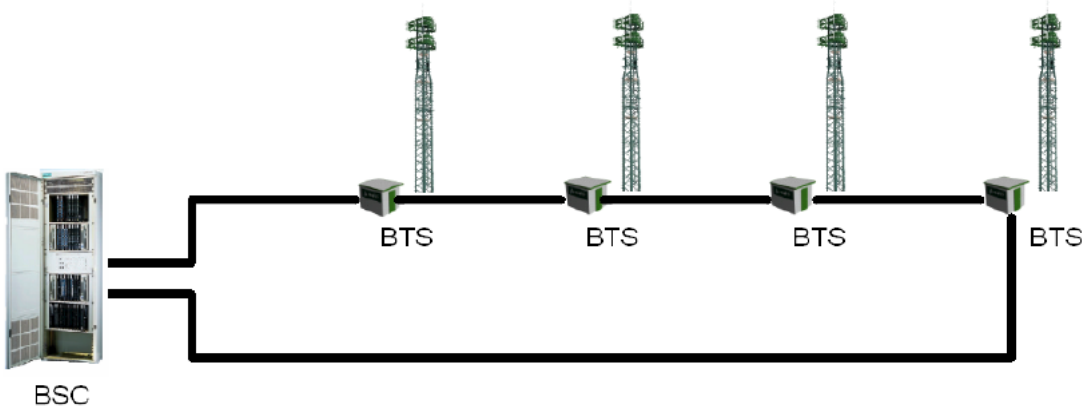
El criterio para la renovación de estas líneas ferroviarias es diseñar un sistema abierto, que permita interconexiones, ampliaciones y actualizaciones futuras, por lo que se opta por cumplir con la totalidad de las especificaciones tanto técnicas como funcionales obligatorias y correspondientes a los proyectos europeos EIRENE [49] y MORANE [50], que definen al estándar GSM-R. Por lo tanto, la solución adoptada asegura la compatibilidad del sistema a instalar tanto con las redes ferroviarias nacionales como con las transeuropeas.

El sistema de comunicaciones móviles GSM-R a desplegar a lo largo de la línea está integrado por todos los elementos hardware, software y de comunicaciones que permiten las comunicaciones móviles entre los operarios embarcados en los trenes y los trabajadores de la explotación en tierra (ubicados en campo o en los centros de control), de acuerdo con unos criterios de calidad, disponibilidad y seguridad de todos los sistemas relacionados con las telecomunicaciones de la línea ferroviaria. Para ello, la línea deberá estar dotada de las siguientes instalaciones:

- Estaciones transceptoras (BTS).
- Estaciones repetidoras (FOR).
- Unidad Controladora de Estaciones Bases (BSC).
- Equipamiento de energía y sistemas auxiliares en casetas de GSM-R.
- Torres.
- Red de cables para las instalaciones de energía.
- Ejecución de la obra civil necesaria para la construcción de los nuevos emplazamientos tanto para estaciones base como para repetidores.

Dado que no se va a hacer un estudio radioeléctrico en esta memoria, asumiremos que para cubrir 150kms en capa doble, para asegurar el servicio de voz y el sistema ETCS. Para ello, será necesario construir 60 emplazamientos GSM-R (1 cada 5kms) con sus torres/mástiles, casetas, cimentaciones, antenas, sistemas de supervisión, alimentación de energía y equipos de transmisión, así como 80 emplazamientos de repetidores con sus mástiles, armarios, antenas y sistema de alimentación, para los 20 túneles existentes (1 por cada boca de túnel).

Para dotar de redundancia y seguridad de la red GSM-R, se ha escogido la configuración de bucle o anillo para la conexión de las BTSs a la BSC que se puede ver en la figura siguiente:



44 - Configuración en anillo de la red GSM-R

3.3.2 Edificios técnicos y Obra Civil Auxiliar

Son absolutamente necesarias las siguientes actuaciones complementarias para dotar de envolvente a los sistemas que hemos descrito anteriormente, dado el estado totalmente vandalizado que suponemos en la línea:

- Construcción de edificios técnicos para las instalaciones de señalización y telecomunicaciones todas las estaciones. Los edificios técnicos estarán compuestos por dos salas independientes, una para los equipos de señalización y otra para los equipos de telecomunicaciones.

- Realización de la red de canalizaciones en toda la línea, contemplando de forma general canalizaciones hormigonadas en estaciones (entre señales de entrada) y canaletas o zanjas en trayecto.

- Instalación de arquetas y cámaras para las segregaciones de cables y empalmes de fibra óptica.

- Levantes y desmontajes de todo aquello que no tenga utilidad o este vandalizado: armarios y cajas de campo, edificios técnicos, señales, cables, etc…

3.4 Estudio Presupuestario

En base a los criterios que hemos adoptado en el capítulo anterior, a la línea que hemos supuesto para hacer el estudio y a las bases de precios que proporciona ADIF [38], podemos hacer un desglose de lo que costaría renovar las instalaciones de seguridad y telecomunicaciones de la línea propuesta.

En el presupuesto siguiente se recogen todas las inversiones necesarias para renovar los diferentes capítulos que hemos ido viendo a lo largo del TFM. Para mantener la misma estructura, lo hemos separado en los siguientes sistemas:

- Sistema de señalización y detección de tren.
- Sistema de protección de tren.
- Control de Tráfico Centralizado.
- Telecomunicaciones fijas.
- Telecomunicaciones móviles.
- Edificios y casetas.
- Obra civil auxiliar.

Contamos con que la obra se realizará en horario diurno, ya que no hay trenes en circulación y que se realizarán todos los trabajos al mismo tiempo (en una sola fase), como si se tratase de una línea nueva. Bien es cierto que, en realidad, antes de la puesta en servicio, cuando ya están todos los sistemas instalados, se debe cumplimentar toda la documentación de seguridad y hacer pruebas finales de concordancia y de paso de tren.

Vamos a presentar la tabla con las mediciones a continuación y tras ella haremos un análisis, con lo que se puede observar:

Id	*Unidad*	*Precio unitario*	*Cantidad*	*Total*
1. SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN				**15.004.283,93 €**
1.1 Puestos Locales de Operación				*120.683,90 €*
CAA010aa	Mobiliario Puesto Local	834,65 €	10	8.346,50 €
CAB010aa	SAM local	11.233,74 €	10	112.337,40 €
1.2 Equipos de Cabina de Señalización				*2.917.797,20 €*
CAC010a	Bastidor de Energía para ENCE	26.485,02 €	10	264.850,20 €
CAC020ba	Unidad central de proceso pequeña (ENCE)	55.379,70 €	10	553.797,00 €
CAC030ba	Bastidor de cables	12.972,99 €	10	129.729,90 €
CAC040a	Cableado red local del ENCE	4.740,09 €	10	47.400,90 €
CAC060a	Equipo bloqueo con ENCE diferente	36.192,05 €	4	144.768,20 €
CAC070a	Registrador Jurídico	18.941,70 €	10	189.417,00 €
CAC080a	Equipo de control ENCE-CTC	24.419,61 €	10	244.196,10 €
CAC110a	Módulo de comunicaciones vitales de bloqueo	6.889,32 €	20	137.786,40 €
CAC120a	Módulo interconexión ENCE-CTC	26.965,17 €	10	269.651,70 €
CAC130aa	Módulo de 12 entradas vitales	5.366,99 €	60	322.019,40 €
CAC130ba	Módulo de 8 salidas vitales	7.453,74 €	45	335.418,30 €
CAC130ca	Módulo 32 entradas/salidas no vitales	3.300,61 €	30	99.018,30 €
CAC140aa	Módulo de control videográfico para 2 monitores	9.781,17 €	10	97.811,70 €
CAC150aa	Módulo de control de pantallas alfanuméricas	8.193,21 €	10	81.932,10 €
1.3 Sistemas de detección de tren				*3.177.462,44 €*
CBB020a	Interfaz ENCE-evaluador de contadores de ejes	8.802,36 €	20	176.047,20 €
CBB030a	Sensor de rueda para desvío	7.008,49 €	56	392.475,44 €
CBB040ba	Evaluador de 16 contadores de ejes	18.677,87 €	20	373.557,40 €
CBB050a	Punto de detección doble para contadores de ejes	6.796,29 €	320	2.174.812,80 €
CBB060a	Ajuste de punto de detección	189,28 €	320	60.569,60 €
1.4 Señales				*1.003.394,74 €*
CCA010acaaa	Señal alfanumérica sobre mástil individual	3.627,55 €	30	108.826,50 €

Id	*Unidad*	*Precio unitario*	*Cantidad*	*Total*
CCA020aaaaa	Señal indicadora de salida en mástil individual	4.185,59 €	50	209.279,50 €
CCA050aaaba	Señal alta de 4 focos LED en basamento de hormigón	6.586,17 €	60	395.170,20 €
CCA040aaaad	Señal alta de 2 focos LED en basamento de hormigón	4.406,11 €	10	44.061,10 €
CCA080aad	Señal baja de 2 focos LED en basamento de hormigón	2.548,28 €	20	50.965,60 €
CCA080baa	Señal baja de 4 focos LED en basamento de hormigón	4.870,19 €	36	175.326,84 €
CCB010a	Placa indicativa "P"	106,20 €	40	4.248,00 €
CCB080a	Pantallas de proximidad sobre poste	775,85 €	20	15.517,00 €
1.5 Aparatos de vía				*501.469,12 €*
CFA010aba	Accionamiento eléctrico con 2 cerrojos de uña	10.906,45 €	40	436.258,00 €
CFA040aa	Comprobador eléctrico de agujas sencillo	2.843,24 €	18	51.178,32 €
CFA060a	Calce móvil descarrilador	1.169,40 €	12	14.032,80 €
1.6 Cajas de Terminales y Armarios				*926.902,22 €*
CDA010ba	Caja de terminales de 25 bornas	683,19 €	240	163.965,60 €
CDA010ca	Caja de terminales de 50 bornas	802,96 €	208	167.016,30 €
CDA010da	Caja de terminales de 100 bornas	1.067,52 €	236	251.934,72 €
CDB010aa	Armario de señalización grande	4.299,82 €	80	343.985,60 €
1.7 Cables de señalización				*3.774.090,00 €*
CEA030aabad	Cable 3x4x0,9mm tipo CCPSSP FR0.1 en zanja	10,27 €	180000	1.848.600,00 €
CEA030aaeaa	Cable 10x4x0,9mm tipo CCPSSP FR0.1 en zanja	16,19 €	60000	971.400,00 €
CEA030aafaa	Cable 14x4x0,9mm tipo CCPSSP FR0.1 en zanja	18,47 €	30000	554.100,00 €
CEA030aagaa	Cable 19x4x0,9mm tipo CCPSSP FR0.1 en zanja	21,77 €	7000	152.390,00 €
CEA030aahaa	Cable 25x4x0,9mm tipo CCPSSP FR0.1 en zanja	25,68 €	2500	64.200,00 €
CEA080abaaa	Cable 4x1,5mm2 tipo EAPSP en zanja	3,77 €	14000	52.780,00 €
CEA080aeaaa	Cable 12x1,5mm2 tipo EAPSP en zanja	6,22 €	21000	130.620,00 €
1.8 Levantes y desmontajes				*42.999,56 €*
CNA010aa	Levante de mesa de mando	75,92 €	10	759,20 €
CNA010db	Levante de cabina metálica	1.805,95 €	10	18.059,50 €
CNA010fa	Levante de bastidor de relés	75,92 €	50	3.796,00 €
CNC010ca	Levante de señal alta	98,73 €	86	8.490,78 €
CNC010ba	Levante de señal baja	32,71 €	40	1.308,40 €
CNC100a	Levante de teléfono de señal	21,90 €	86	1.883,40 €
CNC110aa	Levante de señal alfanumérica	51,08 €	20	1.021,60 €
CND010a	Levante de armario de señalización	1,80 €	200	360,00 €
CND020ca	Levante de cajas de terminales	2,25 €	400	900,00 €
CNF060ca	Levante de accionamiento eléctrico de aguja	229,31 €	28	6.420,68 €
1.9 Ingeniería				*2.422.765,84 €*
CLA010e	Ingeniería de diseño de ENCE para un PAET	21.798,96 €	6	130.793,76 €
CLA010f	Ingeniería de diseño de ENCE para una estación de 4 vias	24.692,38 €	4	98.769,52 €
CLA010h	Ingeniería para diseño de bloqueo automático	7.719,44 €	20	154.388,80 €
CLA010j	Ingeniería de diseño del rejistrador jurídico	8.647,17 €	10	86.471,70 €
CLA010k	Ingeniería de diseño de SAM remota	6.647,67 €	1	6.647,67 €

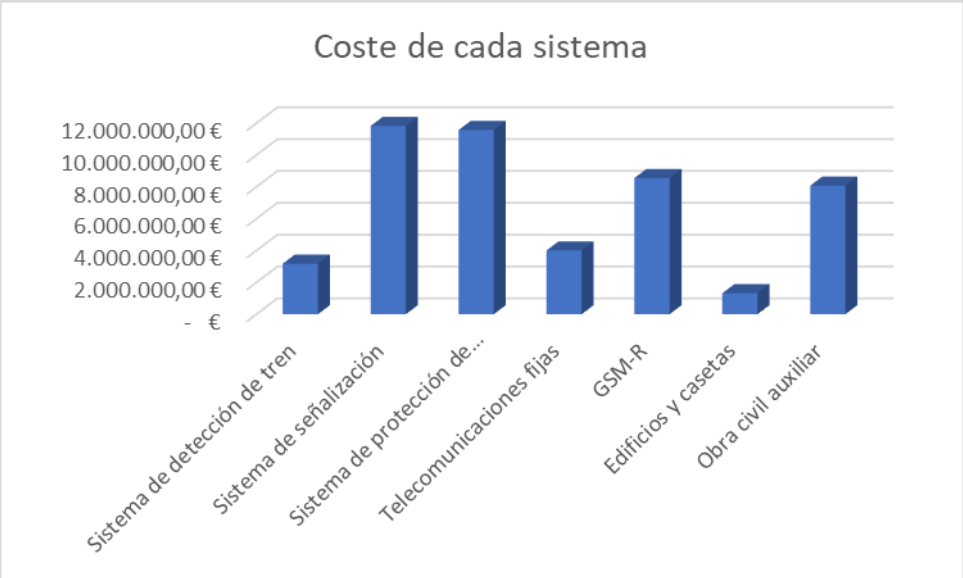
Id	*Unidad*	*Precio unitario*	*Cantidad*	*Total*
CLA010l	Ingeniería de diseño de SAM local	6.049,42 €	10	60.494,20 €
CLA010n	Interfaz de bloqueo con otra tecnología	27.124,04 €	2	54.248,08 €
CLB010d	Ingeniería de aplicación para contadores de ejes	9.045,37 €	20	180.907,40 €
CLC010f	Ingeniería de puesto central de operación de ERTMS	97.217,17 €	1	97.217,17 €
CLC010b	Ingeniería diseño SAM-ERTMS	15.445,65 €	10	154.456,50 €
CLC010c	Ingeniería diseño PCI-ERTMS	11.184,79 €	10	111.847,90 €
CLC010d	Ingeniería comunicaciones ENCE-ERTMS	16.387,93 €	10	163.879,30 €
CLC010j	Ingeniería de desarrollo para central de mantenimiento	69.107,78 €	1	69.107,78 €
CLC030e	Ingeniería de programación ERTMS n2 para PAET	104.817,19 €	6	628.903,14 €
CLC030f	Ingeniería de programación ERTMS n2 para estación	106.158,23 €	4	424.632,92 €
1.10 Documentación y formación				*116.718,91 €*
CMB010aa	Documentación as-built ENCE	7.870,52 €	10	78.705,20 €
CMG020aaa	Curso de elementos de campo	5.788,58 €	1	5.788,58 €
CMG020aba	Curso de ENCE	5.788,58 €	1	5.788,58 €
CMG020aca	Curso de señalización	8.740,88 €	1	8.740,88 €
CMG020bka	Curso de contadores de ejes	17.695,67 €	1	17.695,67 €
2. SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL TREN				**11.571.880,30 €**
2.1 Sistema ASFA				*2.768.970,50 €*
CGA050aaaaa	Baliza de pie L1-L9 de ASFA digital	6.122,40 €	16	97.958,40 €
CGA050baaaa	Baliza de pie y previa L1-L9 de ASFA digital	10.230,81 €	110	1.125.389,10 €
CGA060a	Unidad de conexión de ASFA Digital UCDIG	2.559,53 €	126	322.500,78 €
CGA070a	Equipo intermedio de conexión (EIC)	2.559,53 €	110	281.548,30 €
CGA080aaa	Interfaz antiperturbaciones electromagnéticas	3.989,72 €	236	941.573,92 €
2.2 Sistema ETCS nivel 2				*8.401.851,78 €*
CGB010a	Servidor para puesto central de ERTMS (PCE)	189.622,00 €	1	189.622,00 €
CGB030a	Equipo de Registro Jurídico para PCE	19.210,45 €	1	19.210,45 €
CGB040a	Sistema de ayuda al mantenimiento PCE	133.415,35 €	1	133.415,35 €
CGB060a	Gestor ERTMS de limitaciones temporales de velocidad	22.036,84 €	1	22.036,84 €
CGB070a	Centro de Mantenimiento y Diagnosis (CM)	144.594,09 €	1	144.594,09 €
CGB090a	Puesto de comunicaciones intermedio PCI-ERTMS	19.914,26 €	10	199.142,60 €
CGB100aa	Eurobaliza de información fija	1.227,49 €	100	122.749,00 €
CGB110a	Programación de eurobaliza	124,31 €	100	12.431,00 €
CGB160aa	Interfaz ERTMS-ENCE	37.661,66 €	10	376.616,60 €
CGB160ba	Interfaz RBC-ENCE	97.185,91 €	10	971.859,10 €
CGB170a	Centro de bloqueo por radio (RBC)	2.036.229,89 €	3	6.108.689,67 €
CGB180a	Registro Jurídico para un RBC	19.210,45 €	3	57.631,35 €
CGB190a	Sistema de gestión de claves (KMC) para toda la línea	7.697,48 €	1	7.697,48 €
CGB260a	Integración del PCE en el centro de regulación y control	36.156,25 €	1	36.156,25 €
2.3 Levantes y desmontajes				*23.718,52 €*

Id	*Unidad*	*Precio unitario*	*Cantidad*	*Total*
CNB100ba	Desmontaje de equipo exterior de Circuito de Vïa	27,50 €	150	4.125,00 €
CNB100ca	Desmontaje de bastidor de circuito de vía	134,72 €	20	2.694,40 €
CNG010aa	Levante de unidad de conexión ASFA analógico	71,50 €	126	9.009,00 €
CNG030a	Levante de baliza	31,31 €	252	7.890,12 €
2.4 Documentación y formación				*377.339,50 €*
CMC010bb	Verificación de interoperabilidad de 150kms de ERTMS	2.400,00 €	150	360.000,00 €
CMG010bb	Curso de formación ERTMS de 16 horas	2.887,73 €	4	11.550,92 €
CMG020aeb	Curso de ASFA	5.788,58 €	1	5.788,58 €
3. CTC				**99.695,70 €**
3.1 Ingeniería de Software				*99.695,70 €*
CLF010	Ingeniería para inclusión de ENCE en CTC existente	9.969,57 €	10	99.695,70 €
4. Telecomunicaciones				**12.563.825,93 €**
4.1 Telefonía de explotación				*352.107,87 €*
TFO040aa	Puesto telefónico de intemperie	1.036,15 €	80	82.892,00 €
TFD010aaa	Terminal telefónico digital tipo A	186,72 €	40	7.468,80 €
TFG070dbb	Armario de 19" 42U	1.878,19 €	10	18.781,90 €
TFO010a	Central telefónica para estación	21.508,64 €	10	215.086,40 €
TFO020a	Pupitre de estación para telefonía de explotación	2.005,16 €	10	20.051,60 €
TFO110	Ampliación de una banda en el puesto de mando	7.827,17 €	1	7.827,17 €
4.2 Grabadores				*26.011,20 €*
TFO220b	Equipo de grabación digital hasta 50 canales	13.005,60 €	2	26.011,20 €
4.3 GSM-R				*8.556.080,11 €*
TMA010	Repartidor Digital DDF de 1056 flujos	4.472,24 €	10	44.722,40 €
TMA060	Controlador de estaciones base BSC	156.290,44 €	2	312.580,88 €
TMA080	Estación base BTS indoor	21.018,75 €	60	1.261.125,00 €
TMA100b	Red de tierras para repetidor de 2 sectores en túnel	245,22 €	80	19.617,60 €
TMA110b	Repetidor de fibra óptica de 4 canales selectivos	9.494,65 €	120	1.139.358,00 €
TMA120	Unidad básica de transcodificación (TRAU)	25.431,87 €	2	50.863,74 €
TMA130	Unidad maestra de repetidores BMU en caseta GSM-R	5.470,40 €	80	437.632,00 €
TMB010lcb	Guía-ondas BTS de 40m para 3 sectores con 2 celdas	5.078,64 €	40	203.145,60 €
TMC010aaa	Antena GSM-R cruzada A-panel apertura 30º	965,64 €	120	115.876,80 €
TCH010aaaaa	Cable radiante de 1 5/8" para túnel	13,72 €	10000	137.200,00 €
TMD040	Servidor de sistema de supervisión OMC-R	104.762,28 €	1	104.762,28 €
TMD050	Servidor de gestión de repetidores	16.513,94 €	1	16.513,94 €
TME070c	Integración de telecomunicaciones en red inteligente	714,78 €	10	7.147,80 €
TME090	Pruebas de integración MSC-RBC	1.903,80 €	2	3.807,60 €
TMH010	Servidor del sistema de gestión del panel de alarmas	18.002,73 €	1	18.002,73 €
TMM020c	Balizamiento nocturno tipo LED para torre de	513,29 €	60	30.797,40 €

Id	*Unidad*	*Precio unitario*	*Cantidad*	*Total*
	30m			
TMM050a	Red de tierras para BTS	230,43 €	60	13.825,80 €
TMM050c	Red de tierras para torres de celosía	983,48 €	60	59.008,80 €
TMM060c	Torre de celosía de 30m para GSM-R y operadores	23.852,39 €	20	477.047,80 €
TMM080f	Torre de celosía de 30m para antenas GSM-R	20.548,80 €	40	821.952,00 €
TMN010b	Caseta de hormigón 3,7x2,2x2,5m equipada	9.730,48 €	140	1.362.267,20 €
TMN030d	Sistema de refrigeración para GSM-R de 7,51W	2.655,63 €	140	371.788,20 €
TMP060	Certificación interoperabilidad GSM-R por NoBo	9.185,54 €	1	9.185,54 €
TMR010a	Armario de energía AC y DC segura para GSM-R	10.984,65 €	140	1.537.851,00 €
4.4 Red IP				*1.706.374,36 €*
TFB010a	Regenerador óptico gigabit ethernet 100km	7.827,72 €	2	15.655,44 €
TFB020aa	Router IP/MPLS de agregación	142.729,31 €	2	285.458,62 €
TFB030a	Router IP/MPLS de acceso a la red	47.442,27 €	20	948.845,40 €
TFB070ba	Tarjeta de 2 puertos GBE SFP	12.322,84 €	10	123.228,40 €
TFB050aa	Tarjeta de 12 puertos 10/100 Base-T	7.630,51 €	20	152.610,20 €
TFC030aa	Switch L2/L3 redundante equipado con 20 puertos GbE	3.567,36 €	10	35.673,60 €
TFG080aaaa	Panel de parcheo RJ45 de 48 puertos	143,46 €	20	2.869,20 €
TFG240a	Repartidor óptico para rack de 19"	251,54 €	10	2.515,40 €
TFG330	Desmontaje de los equipos obsoletos	13.631,81 €	10	136.318,10 €
TCA030aaaaa	Cable de datos UTP 6e	1,28 €	2500	3.200,00 €
4.5 Rectificadores				*20.292,40 €*
TFI020	Sistema rectificador 230Vca/48Vcc de 1000W	1.014,62 €	20	20.292,40 €
4.6 Tendidos F.O.				*1.720.806,43 €*
TFG130fb	Caja de empalme de 2x16FO	613,85 €	150	92.077,50 €
TFG140aa	Ejecución de empalme por fusión 2x16FO	230,89 €	150	34.633,50 €
TFG140ba	Ejecución de empalme por fusión 2x32FO	396,46 €	8	3.171,68 €
TFG140ea	Ejecución de empalme por fusión 2x128FO	1.481,35 €	75	111.101,25 €
TFG170aca	Repartidor mural equipado para 36FO	1.528,72 €	150	229.308,00 €
TFG150aa	Empalme de segregación de 128FO o 32FO a 16FO	257,64 €	150	38.646,00 €
TCJ010ebbb	Cable de 128FO con cubierta TKEST en canaleta	4,78 €	150000	717.000,00 €
TCJ010bbbb	Cable de 32FO con cubierta TKEST en canaleta	2,79 €	150000	418.500,00 €
TFG180bb	Conectorización de hasta 16FO a repartidor	321,36 €	150	48.204,00 €
TFG190a	Medidas ópticas de reflectometría y atenuación para 1FO	14,72 €	1600	23.552,00 €
TCF010abba	Cable de 16FO con cubierta TKEST en canaleta	2,05 €	2250	4.612,50 €
4.7 Obra civil específica de comunicaciones				*80.378,00 €*
TFI010b	Adaptación de salas técnicas	8.037,80 €	10	80.378,00 €
4.8 Documentación y formación				*101.775,56 €*
TFL010c	Curso avanzado de telecomunicaciones	9.652,64 €	4	38.610,56 €
TMP010	Documentación as-built por cada emplazamiento	421,10 €	150	63.165,00 €
5. Edificios y casetas técnicas				**1.320.779,20 €**
5.1 Edificios de nueva construcción				*1.320.779,20 €*

Id	*Unidad*	*Precio unitario*	*Cantidad*	*Total*
	Caseta prefabricada hormigón 6,3x3,9x2,6m	25.675,27 €	20	513.505,40 €
	Losa de cimentación para caseta	39,85 €	500	19.925,00 €
	Cuadro de distribución eléctrico	4.009,90 €	20	80.198,00 €
	Red de tierras para caseta	900,81 €	20	18.016,20 €
	Sistema de protección contra corrientes y descargas	9.850,00 €	20	197.000,00 €
	Sistema de detección y extinción de incendios	5.200,00 €	20	104.000,00 €
	Climatización	9.200,00 €	20	184.000,00 €
	Canalización hormigonada de entrada al edificio	921,70 €	200	184.340,00 €
	Arqueta de registro de entrada a caseta	989,73 €	20	19.794,60 €
6. Obra Civil				**8.076.339,50 €**
6.1 Zanjas				*967.800,00 €*
	Tubo polietileno corrugado 110mm	12,71 €	60000	762.600,00 €
	Zanja para tendido de cables excavación mecánica	4,60 €	20000	92.000,00 €
	Zanja para tendido de cables excavación manual	11,32 €	10000	113.200,00 €
6.2 Canalizaciones				*309.410,00 €*
	Percha para cables con 6 fichas en túneles	21,97 €	8000	175.760,00 €
	Canalización hormigonada 4 tubos de PE de 110mm	53,46 €	2500	133.650,00 €
6.3 Canaletas				*3.566.400,00 €*
	Canaleta prefabricada de hormigón con tapa	29,72 €	120000	3.566.400,00 €
6.4 Arquetas y cámaras de registro				*3.232.729,50 €*
	Cámara mediana de registro de hormigón con tapa	1.053,27 €	3000	3.159.810,00 €
	Arqueta de registro realizada in situ mediana	486,13 €	150	72.919,50 €

Tras la presentación de la tabla de mediciones, vamos a sintetizar, por sistemas el coste que representa:



45- Coste por sistema de la renovación

Podemos ver que el total de la inversión es aproximadamente de 48,5M€, sin impuestos (21%), ni beneficio industrial (9%), ni gastos generales (6%).
Si hacemos un ratio por kilómetro, nos sale a 325k€/km, lo cual podemos extrapolar a otras líneas que queramos renovar de similares características.

Es importante reseñar que la parte de Obra Civil incluida es la que responde únicamente a las necesidades de los sistemas estudiados. Si fuere preciso acondicionar la vía, mover tierras, obras de fábrica, etc..., nos iríamos a cifras mucho más elevadas [40], pero están fuera de nuestras asunciones.

En cuanto a la parte de telecomunicaciones, que por el carácter del TFM, es la parte que más nos preocupa, podemos destacar que suponen únicamente ¼ del total (amarillo y azul en la figura siguiente) de la renovación propuesta.

46 - Coste proporcional del sistema GSM-R respecto al total

Como vemos, por 8,5M€ (56k€/km) podemos dotar a la línea de GSM-R de doble capa, con el objetivo doble de:

- Hacer la línea interoperable mediante el sistema ERTMS
- Conseguir la trazabilidad de los trenes y permitir abrir un canal particular para que puedan transmitir de forma continua los datos que necesiten respecto al estado de sus mercancías.

Es interesante destacar que los proyectos de GSM-R son muy complejos de desarrollar (se puede apreciar en la tabla de mediciones que es el capítulo que más ítems tiene), pero que cuesta relativamente poco ejecutar sus obras.

Ya habíamos puesto en relieve durante los capítulos anteriores la necesidad y beneficios de las radiocomunicaciones para la trazabilidad de las mercancías. Sin embargo, ahora podemos reflejar la representación del impacto económico

que tiene respecto a una actuación más global en el ámbito de una renovación. Podríamos decir que el coste de las radiocomunicaciones en este sentido es muy escaso respecto a otros, que son absolutamente imprescindibles, por lo que la relación coste/beneficio parece muy favorable.

Quedando clara la viabilidad de incluir un sistema de radiocomunicaciones en las renovaciones de vías abandonadas para el tráfico de mercancías inteligentes, podemos demostrar que se trata de una tecnología que, a pesar de no ser muy innovadora (GSM-R), es capaz de proporcionar grandes beneficios para la logística y, por ende, para la mejora de ciudades interconectadas (*Smart Mobility*), con la ventaja de tratarse de una tecnología madura, homologada y muy bien regulada, de implementación inmediata, la cual no necesita un desarrollo previo.

Por último, dado que se trata de un campo muy específico (comunicaciones ferroviarias), vamos a poner en contexto estos datos económicos respecto a otros proyectos que quizás nos queden más cercanos, con el objetivo de comprender hasta qué punto es importante el peso de las telecomunicaciones en este tipo de obras.

Por ejemplo, recientemente se ha redactado el Estudio Informativo de la remodelación de la estación ferroviaria de Abando – Indalecio Prieto en Bilbao [51]. El presupuesto general estimado ha sido el siguiente [52]:

ESTUDIO INFORMATIVO DE LA NUEVA RED FERROVIARIA DEL PAÍS VASCO. CORREDOR DE ACCESO Y ESTACIÓN DE BILBAO-ABANDO. FASE B

ESTACIÓN

01.	OBRA CIVIL	131.065.266,91 €
1.1	DEMOLICIONES Y MOVIMIENTO DE TIERRAS	8.550.612,51 €
1.1	DRENAJE	319.100,00 €
1.3	ESTRUCTURAS	114.768.954,40 €
1.4	SOTERRAMIENTO TRINCHERA	7.426.600,00 €
02.	VIA	15.681.977,50 €
03.	ELECTRIFICACIÓN	4.643.265,00 €
04.	INSTALACIONES SEGURIDAD Y COMUNICACIONES	27.038.669,00 €
05.	ARQUITECTURA Y URBANISMO	111.849.790,00 €
06.	SERVICIOS AFECTADOS	1.567.290,00 €
06.	SITUACIONES PROVISIONALES	7.748.665,50 €
08.	INTEGRACIÓN AMBIENTAL	7.253.755,34 €
09.	IMPREVISTOS	30.684.867,92 €
10.	SEGURIDAD Y SALUD	6.750.670,94 €
	TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL	344.284.218,12 €

PEM (Presupuesto de Ejecución Material)	344.284.218,12 €
Gastos Generales (GG) (13%)	44.756.948,36 €
Beneficio Industrial (BI) (6 %)	20.657.053,09 €
Suma (PEM, GG y BI)	409.698.219,56 €
I.V.A, (21%) sobre Suma (PEM, GG y BI)	86.036.626,11 €
PBL (Presupuesto Base de Licitación)	495.734.845,67 €

47 - Presupuesto preliminar de la renovación de la estación de Abando

Vemos cómo la señalización y las telecomunicaciones tienen un peso pequeño respecto al resto de la obra, concretamente, el 7,85%, especialmente, teniendo en cuenta que la parte de edificación y obra civil son las primordiales del presupuesto por las características de la obra. Sin embargo, la elección de los sistemas correctos es la que puede marcar la diferencia entre tener una estación intermodal "conectada" o no tenerla.

Quizás más cercana, por su generalidad, nos pueda quedar la comparativa de una Infraestructura Comunitaria de Telecomunicaciones (ICT) en el coste global de un edificio.

Por ejemplo, el coste de construcción para una edificación residencial abierta con una altura de entre 3 y 8 plantas, de entre 20 y 80 viviendas de una superficie útil media de 70m² y de un nivel medio de acabados [53] es de 603,49€/m^2.

Según el proyecto de fin de grado de un alumno de la Universidad Politécnica de Valencia [54], para el mismo tipo de edificación, el coste de construcción de la ICT es de 77.769,40€. A efectos de realizar una métrica comparativa, contando que se trata de 60 viviendas con 80m^2 cada una, da un coste de 16,20€/m^2. Por lo tanto, las telecomunicaciones suponen el 2,68% del coste total de la obra.

En la siguiente tabla podemos ver comparativamente el coste de las telecomunicaciones contextualizado en cada tipo de obra:

Tipo de obra	Coste de telecomunicaciones	% sobre el total de la obra	Consideraciones
Remodelación de línea ferroviaria	12,5M€	25,77%	Sólo obra civil imprescindible
Remodelación de estación ferroviaria	27M€	7,85%	Incluye señalización ferroviaria
Construcción de 60 viviendas en 5 bloques	77,8k€	2,68%	

48 - Tabla comparativa de costes de telecomunicaciones en obras

De lo cual se puede inducir, que las telecomunicaciones en las obras ferroviarias tienen un peso importante en comparación con las obras de edificación habituales, siendo además su impacto sobre la ciudad mucho mayor en lo referente a los objetivos de una *Smart City* [55].

4 Conclusiones

A la vista del trabajo realizado, podemos extraer varias conclusiones que nos permitan resumirlo en varios aspectos, para finalmente saber si hemos cumplido con los objetivos planteados originalmente o no.

4.1 Técnicas

- Desde Europa se está incentivando fuertemente el transporte de mercancías ferroviarias, mediante el trasvase desde otros medios de transporte más contaminantes.
- La logística actual requiere que el cliente esté siempre informado del estado de su mercancía, mediante una trazabilidad completa desde su origen hasta su destino.
- Es probable que en el futuro se requiera conocer otras variables sobre el estado de la mercancía en tiempo real, lo cual puede aumentar el ancho de banda necesario en las comunicaciones tren-tierra, ante lo que intuimos GSM-R como un sistema muy limitado.
- Para que la línea pueda ser una alternativa al tráfico de carretera, es preciso que se adapte a alguna de las tecnologías de transporte de semirremolques que hemos visto, cada una con sus ventajas e inconvenientes.
- Si la línea ferroviaria debe ofrecer frecuencias competitivas para el tráfico de mercancías, debe limitar mucho los trenes de viajeros y armonizar la velocidad de los trenes que circula por ella, de forma que la distancia entre ellos disminuya.
- Existen actualmente instalados en las líneas de la RFIG sistemas de telecomunicaciones que permiten la comunicación entre el tren y tierra de forma puntual (balizas) o de forma continua (radio).
- Las alternativas actualmente en uso en la RFIG para los enlaces radio son el sistema Tren-Tierra y el sistema GSM-R. Hasta que no se normalice, regule y pruebe otro sistema alternativo, la opción viable es GSM-R, ya que el Tren-Tierra está muy limitado y en vías de desaparición. GSM-R está garantizado al menos hasta 2030 por los fabricantes.

4.2 Económicas

- Vemos que, para hacer el seguimiento del estado de las mercancías, con una sola capa de cobertura de GSM-R sería suficiente. Sin embargo, hemos incluido 2 capas para dotarle del sistema ETCS de nivel 2. En caso de no requerirse interoperabilidad, simplemente habría que dividir la parte de comunicaciones móviles entre 2, para abaratar la instalación.
- Nótese que en el presupuesto no hemos incluido capítulos muy importantes por no estar directamente relacionados con los objetivos perseguidos en este trabajo, como son los siguientes: plataforma y vía, electrificación (catenaria y subestaciones), suministro de energía y

pasos a nivel. Se calcula que, de la construcción de una nueva línea ferroviaria, sólo el 15% es la parte dedicada a la señalización y telecomunicaciones [40]. En nuestro caso, se trata de una renovación y hemos asumido que no se toca la obra civil ni se hacen trabajos de energía. Sin embargo, en caso de querer que la línea sea interoperable, deberá renovarse la línea por completo, quedando quizás exento el movimiento de tierras y siendo totalmente obligatorio cambiar el resto.

4.3 Generales

Viendo los gastos necesarios para la renovación, se ha decidido equipar las líneas con los requerimientos necesarios para que se considere interoperable. De este modo, si en algún momento se requiere que las mercancías europeas pasen por estas líneas, se podrá hacer. La traba económica principal siempre va a ser la infraestructura, ya que se requiere cambiar el ancho del carril, adaptar los túneles y electrificar a 25kV. Pero si así se requiriese, la señalización y comunicaciones no deben suponer un problema. Con la tabla que hemos hecho, por capítulos, es fácil restar lo que no sea necesario.

Vemos que la parte de señalización y comunicaciones no representa una gran cantidad de dinero, por lo que, antes de estudiar la viabilidad de abrir la línea, es preciso matizar si queremos que sea interoperable y calcular los costes de obra civil y energía necesarios, puesto que serán determinantes para tomar una decisión.

Si no queremos que la línea sea interoperable y limitamos su uso para mercancías que se mueven dentro del estado, entonces, su puesta en servicio es muy rápida y económica. Esto nos lleva a pensar que para liberar camiones de la carretera, se pueden plantear estas líneas como autopistas ferroviarias para el transporte de semirremolques entre grandes centros logísticos, como puertos y zonas de actividades logísticas (ZAL) [41], con el valor añadido de poder monitorizar en todo momento el estado de la carga, mediante el enlace radio GSM-R.

Es interesante observar que no es necesario desarrollar o aplicar las más nuevas tecnologías para llevar a cabo una mejora sustancial en la interconexión de *Smart Cities*, sino que a la tecnología existente (GSM-R), se le puede dar unos usos hasta ahora no previstos que modifiquen el mundo de la logística ferroviaria. Simplemente se trata de coordinar las necesidades de todos los actores mencionados y abrir el canal para poder conseguir que no haya una rotura de la trazabilidad de las mercancías cuando se produce un cambio de modo de transporte (carretera-tren-barco).

Sintetizando, recordemos que los objetivos planteados inicialmente eran los siguientes:

- *Crear una metodología general de estudio para la cuantificación del presupuesto necesario destinado a recuperar las líneas en desuso*

para el tráfico exclusivo de mercancías – Capítulos de señalización y telecomunicaciones.

Consideramos que, una vez determinadas las características específicas de la línea que queramos renovar, son totalmente aplicables los criterios que hemos expuesto en este trabajo para su ejecución o, al menos, para su valoración preliminar, al carecer, obviamente, del detalle suficiente para su construcción.

- *Estudiar las alternativas tecnológicas actuales y valorar las más adecuadas para la gestión de la trazabilidad continua de las mercancías, tanto técnica como económicamente.*

Se ha hecho un repaso general del estado del arte en el mundo de la logística ferroviaria y las tecnologías en uso más actuales para poder determinar y tener el criterio suficiente de cara a una hipotética renovación de líneas obsoletas o abandonadas. Se han aportado soluciones concretas y valoraciones precisas de su coste para una implementación práctica.

- *Aportar una solución al problema de la trazabilidad de mercancías ferroviarias desde la perspectiva del administrador de las infraestructuras.*

Ante un requerimiento por parte de los operadores logísticos y ferroviarios, el administrador de infraestructuras tiene ahora en su mano ofrecerles una plataforma física fiable y continua sobre la que enviar los datos del tren a tierra que más les interesen, mediante el alquiler de un canal GSM-R dedicado a estos, como un servicio más ofertado.

- *Estudiar la viabilidad de renovar líneas actuales en desuso o abandonadas para el tráfico de mercancías principalmente. Determinar si pueden enmarcarse en un contexto interoperable o sólo a nivel nacional.*

Hemos aprendido que, para dotar de interoperabilidad a la línea, la decisión depende prácticamente del coste de las actuaciones en obra civil y energía, ya que son las que se llevan la mayor parte del presupuesto global. En caso de una puesta en marcha a nivel nacional solamente, con una baja inversión, se puede retirar mucho tráfico de las carreteras españolas.

Podemos decir que, en gran medida, los objetivos iniciales se han cumplido y que se han obtenido conclusiones que no parecían tan obvias al principio del trabajo.

4.4 Líneas de trabajo futuras

Como trabajos posteriores deseables quedarían los siguientes:

- Hacer un seguimiento temporal del estado de trasvase de las mercancías hacia el sector ferroviario para replantear los resultados de este estudio.
- Actualizar las técnicas empleadas (especialmente la evolución de GSM-R) según la normativa vaya permitiendo su uso, de cara a mejorar las prestaciones actuales.
- Identificar todas las líneas que pueden ser objeto de renovación y sobre las que aplicar esta metodología.
- Comprobar que, ante todas ellas, la metodología propuesta es válida y no se desvía sustancialmente respecto a la aquí propuesta.
- Enmarcar este estudio en alguno de mayor alcance, incluyendo otras técnicas como infraestructura y energía para comprobar, primero el impacto real que tiene la señalización y comunicaciones sobre el total y, segundo, para ver si varía la viabilidad de este tipo de renovaciones de líneas para uso exclusivo de mercancías.
- Hacer un estudio de tráfico ligado a cada línea a renovar para saber el impacto que puede tener la inclusión de trenes de viajeros, en modalidad de cercanías extendidas o media distancia.
- Hacer un estudio radioeléctrico para comprobar la cobertura en la línea real a modificar.
- Analizar la trazabilidad de las mercancías desde el punto de vista del Operador Ferroviario, con el desarrollo e investigación de redes locales de tren basadas en IoT, Zigbee, WiFi o 5G, de manera que la cabeza de tren pueda recopilar los datos de todos los vagones con sus mercancías. De este modo, a partir de un canal de GSM-R, se puede mandar al Puesto de Mando la información del estado de cada mercancía del tren.

5 Glosario

ADIF: Administrador de Infraestructuras Ferroviarias
AESF: Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria
ASFA: Anuncio de Señales y Frenado Automático
ATP : Automatic Train Protection (Protección automática de tren)
BSC: Base Station Controller
BTS: Base Transceiver Station
CTC: Control de Tráfico Centralizado
ERTMS: European Traffic Management System, o Sistema Europeo de Gestión del Tráfico
ETCS: European Train Control System
ETML: European Traffic Management Layer
FOR: Fiber Optic Repeater
GPS: Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
GSM-R: Global System for Mobile Communications–Railway
IP: Internet Protocol
MPLS: Multiprotocol Label Switching
RBC: Radio Block Center o Centro de Bloqueo por Radio
RCF: Reglamento de Circulación Ferroviaria
RFIG: Red Ferroviaria de Interés General
SDH: Synchronous Digital Hierarchy
SRS: System Requirements Specifications
STM: Specific Transmisión Module o Módulo de Transmisión Específico
TEN-T: Red Transeuropea de Transporte
UIC: Union Internationale des Chemins de fer.
UIRR: Unión Internacional Raíl Ruta
UNE: Asociación Española de Normalización

6 Bibliografía

[1] https://www.boe.es/doue/2010/276/L00022-00032.pdf (visto el 24/02/21)
[2] http://adif.es/es_ES/empresas_servicios/corredores.shtml (visto el 24/02/21)
[3] https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_ferrocarril_en_España (visto el 01/03/2021)
[4] https://www.interempresas.net/Smart_Cities/Articulos/231400-UNE-publica-norma-que-establece-nuevo-estandar-de-estacion-inteligente-de-ferrocarril.html (visto el 01/03/2021)
[5] https://www.sick.com/es/es/sectores/trafico/trafico-ferroviario/gestion-del-trafico-ferroviario/identificacion-de-trenes-a-plena-marcha/c/p604746 (visto el 02/03/2021)
[6] https://blog.driv.in/es/logistica-inteligente-que-es-y-como-puede-ayudar-a-tu-negocio/ (visto el 02/03/2021)
[7] https://www.marinetraffic.com/es/ais/home/ (visto el 02/03/2021)
[8] https://www.wtransnet.com/es/empresa-transporte-cargas/ (visto el 03/03/2021)
[9] http://utetilo.com/ (visto el 04/03/2021)
[10] https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/sociedades/renfe-mercancias/mercancias-conocenos/Innovacion (visto el 04/03/2021)
[11] http://adif.es/es_ES/empresas_servicios/servicios_logisticos/servicios_logisticos.shtml (visto el 02/03/2021)
[12] http://adif.es/es_ES/ocio_y_cultura/fichas_informativas/ficha_informativa_00022.shtml (visto el 06/03/2021)
[13] https://apps.fomento.gob.es/CVP/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=FE0007 (visto el 06/03/2021)
[14] https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/eu-affairs/20210107STO95106/2021-ano-europeo-del-ferrocarril (visto el 07/03/2021)
[15] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es (visto el 08/03/2021)
[16] https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR16_08/SR_RAIL_FREIGHT_ES.pdf (visto el 08/03/2021)
[17] Libro “Transporte Ferroviario de Mercancías” de I.Sanz, I de Peñaranda, J.C. Enguix y J.Mas, editado por Marge Books en 2013
[18] https://elmercantil.com/2021/03/05/adif-prepara-la-normativa-de-galibos-para-desarrollar-las-autopistas-ferroviarias/ (visto el 09/03/2021)
[19] https://es.wikipedia.org/wiki/Vag%C3%B3n_de_piso_bajo_Modalohr (visto el 10/03/2021)
[20] https://www.diarioabierto.es/357251/espana-francia-lanzan-las-autopistas-ferroviarias-los-camiones-crucen-los-pirineos-tren (visto el 10/03/2021)
[21] https://atafteruel.blogspot.com/2017/10/la-importancia-de-los-horarios-en-el.html (visto el 11/03/2021)
[22] http://comofuncionanlostrenes.blogspot.com/2012/12/fotos.html (visto el 12/03/2021)
[23] Especificación Técnica de ADIF: ET 03.365.003.7 “Asfa Digital Vía”

[24] Norma NAS 840 de ADIF: “Requisitos funcionales y reglas de ingeniería ERTMS nivel 1 y nivel 2”
[25] https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_europeo_de_gesti%C3%B3n_del_tr%C3%A1fico_ferroviario (visto el 12/03/2021)
[26] Especificación Técnica de ADIF: ET 03.365.011.0 “Señales luminosas modulares para focos LED”
[27] https://www.cervi.es/ES/3-productos/25--cables-para-uso-ferroviario/331-cable-eapsp-r-cuadretes.html (visto el 12/03/2021)
[28] https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:c0a13519-6066-4d88-a066-87787158720b/version:1539551291/momm-b10150-00_clearguardtcm100d72dpi.pdf (visto el 13/03/2021)
[29] Proyecto Fin de Carrera de Carlos Portillo: “Instalación del sistema de transmisión SDH entre las estaciones ferroviarias del tramo Santander-Bárcena” de la Universidad de Cantabria, en 2017.
[30] https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/multiprotocol-label-switching-mpls/mpls/4649-mpls-faq-4649.html (visto el 15/04/2021)
[31] https://www.trenvista.net/formacion/escuela-trenvista/tren-tierra-radiotelefonia-ferroviaria/ (visto el 16/03/2021)
[32] https://en.wikipedia.org/wiki/GSM-R (visto el 20/03/2021)
[33] https://www.trenvista.net/a-fondo/cual-es-el-futuro-del-gsm-r/ (visto el 22/03/2021)
[34] https://es.wikipedia.org/wiki/Ferrocarril_directo_Madrid-Burgos (visto el 25/03/2021)
[35] https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_Plasencia-Astorga (visto el 25/03/2021)
[36] https://www.elsaltodiario.com/tren/recuperacion-linea-plasencia-salamanca-no-requiere-nuevo-trazado- (visto el 25/03/2021)
[37] https://es.wikipedia.org/wiki/Accidente_ferroviario_de_Chinchilla_de_Montearag%C3%B3n (visto el 26/03/2021)
[38] https://www.seguridadferroviaria.es/actividades/interoperabilidad (visto el 28/03/2021)
[39] Norma de ADIF NAG 9-0-0.0 “Criterios generales de uso de las bases de precios de ADIF”.
[40] https://www.europapress.es/galicia/noticia-cada-kilometro-red-ave-costo-18-millones-euros-20131013133818.html (visto el 19/04/2021)
[41] https://www.transeop.com/blog/zal-zonas-actividades-logisticas/363/ (visto el 19/04/2021)
[42] https://blog.solistica.com/iot-y-su-aplicacion-en-logistica (visto el 21/05/2021)
[43] https://blog.terranea.es/fenomeno-platooning/ (visto el 25/05/2021)
[44] https://novocargo.com/cross-docking-en-logistica-que-es-fases-y-tipos/ (visto el 25/05/2021)
[45] https://www.mecalux.es/blog/blockchain-logistica (visto el 26/05/2021)
[46] https://blogs.x.uoc.edu/logistica/principales-operadores-logisticos-de-espana/ (visto el 26/05/2021)
[47] https://saladeprensa.renfe.com/renfe-mercancias-pone-en-servicio-un-centro-de-alta-tecnologia-digital-para-la-gestion-y-el-control-del-trafico-de-sus-trenes/ (visto el 27/05/2021)

[48] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_20_2329 (visto el 25/05/2021)
[49] https://uic.org/rail-system/gsm-r/ (visto el 26/05/2021)
[50] MORANE “Usage of the UUIE in the GSM-R environment”, Ref. H 22 T 0001
[51] https://www.infrastructure.sener/es/proyecto/estudio-informativo--acceso-nueva-red-ferroviaria-pais-vasco-estacion-abando (visto el 29/05/2021)
[52] https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/esinf_paisvasco-bilbao-abando_d3_valoracion.pdf (visto el 29/05/2021)
[53] https://www.five.es/productos/herramientas-on-line/modulo-de-edificacion/ (visto el 30/05/2021)
[54] https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/93008/CANO%20-%20Proyecto%20de%20Infraestructura%20Com%C3%BAn%20de%20Telecomunicaciones%20%28ICT%29%20en%20un%20conjunto%20inmobiliario%20...pdf?sequence=1 (visto el 20/05/2021)
[55] https://es.wikipedia.org/wiki/Ciudad_inteligente (visto el 10/03/2021)