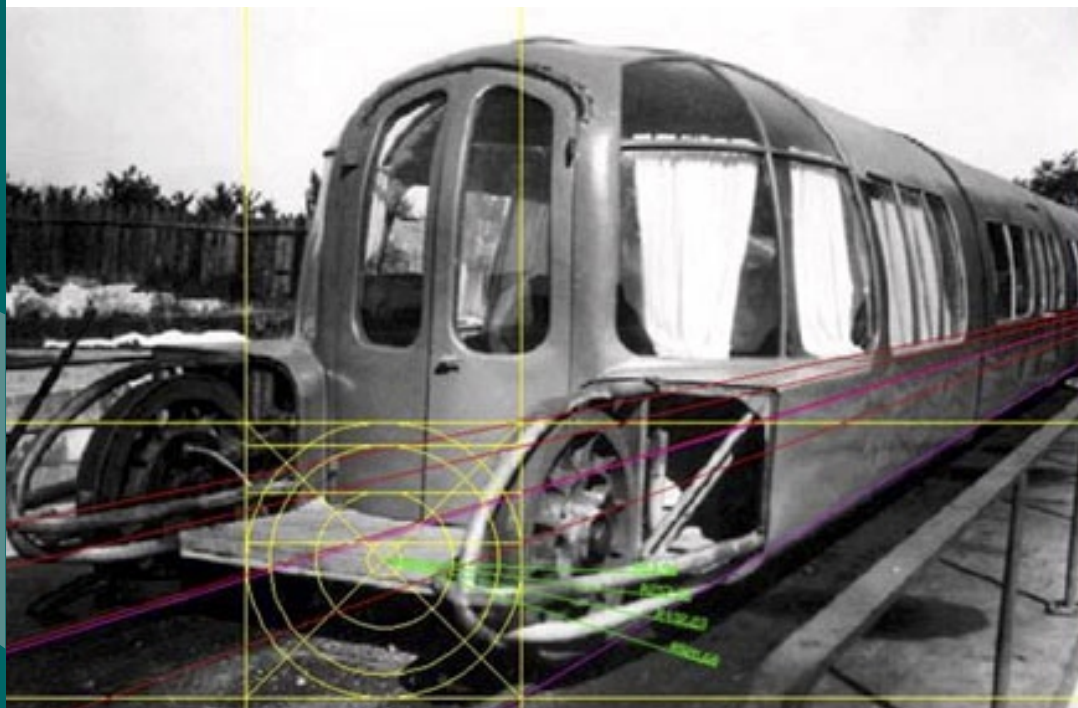




## Ingeniería inversa de las estructuras triangulares y del Talgo I

### Estudio de repercusiones de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad en obras de permeabilización de la red ferroviaria de interés general española



- Estimación del consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> en trenes de mercancías y análisis de la variabilidad
- Instalación para el estudio de la propagación de ondas de presión en conductos y su aplicación en túneles para trenes de alta velocidad
- Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes
- Estrategia para el mantenimiento de una LAV durante 20 años
- Configuración e implantación del sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 en el tramo entre Plaza España-Martorell Enllaç de la línea Llobregat-Anoia de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya
- Ventajas de la participación pública en el estudio de alternativas de trazados ferroviarios
- Alta velocidad y desarrollo urbano. 30 años de experiencias
- Locomotora Naval 1322 de FEVE. Reforma, funcionamiento, prestaciones
- Sistema EIDOS

Número monográfico con los trabajos galardonados en el "I Premio Tria Railway RD para Jóvenes Ingenieros Ferroviarios".



Edita:



**Consejo asesor:**

José Luis López Gómez  
Premio TALGO

Sergio Lopez Lara  
Premio TRIA Railway R&D

Andrés López Pita  
Aula y Premio COMSA

Eduard Rodés  
Director Escola Europea de Short Sea Shipping

Eduardo Romo Urroz  
Fundación Caminos de Hierro

Emilio Larrode Pellicer  
Universidad de Zaragoza

Ignasi Perat Benavides  
Master en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica (UPC)

Julio Fuentes Losa  
Curso de Experto Universitario de Ingeniería Ferroviaria (UNED) y Congreso de Innovación Ferroviaria.

José Francisco Baños Pino  
Master en Transporte y Gestión Logística (Universidad de Oviedo)

José Cañizares Moyano  
Asociación Europea de Ferroviarios

**Consejo de redacción:**

Jaime Barreiro Gil (Director editorial, FFE)

Alberto García Álvarez (FFE)

Juan Manuel Jiménez Aguilar (FFE)

Pilar Lozano Carbayo (FFE)

Miguel Jiménez Vega (FFE)

J. Mariano Rodríguez Martínez (Secretario, FFE)

Antonio Berrios Villalba (ADIF)

Rodolfo Ramos Melero (CEU)

## Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria

La revista *Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria* es una publicación científica digital con versión impresa que pretende acoger los artículos que dan a conocer resultados de investigaciones, estudios o desarrollos relevantes en el ámbito del transporte en general y del ferrocarril en particular.

Pretende esta revista tener una utilidad práctica para el sector, cubriendo -al menos parcialmente- el vacío detectado entre las revistas divulgativas y las revistas académicas internacionales indexadas, éstas últimas al alcance de pocas personas y no orientadas (por su propia naturaleza) hacia el sector industrial. Con ello se espera poner a disposición de los actores y ejecutivos del sector la información relevante derivada de los estudios e investigaciones realizadas. También pretende servir de apoyo a los investigadores españoles, en especial a los jóvenes y a los que desarrollan su actividad en empresas, ofreciéndoles la posibilidad de dar a conocer sus trabajos. Los proyectos de investigación nacionales e internacionales disponen también, con la revista, de una plataforma de diseminación para facilitar la transferencia de resultados a la industria.

Los números regulares de la revista se publican con una periodicidad semestral, y también se publican (con numeración correlativa con los anteriores) números monográficos, con la producción de la convocatoria de un premio, un congreso, unas jornadas, o un proyecto de investigación.

La revisión de los artículos de los números ordinarios corresponde al Consejo Asesor de la revista, mientras que las de los números extraordinarios se entiende asumida por el jurado en el caso de los premios, por el comité científico del congreso o por el grupo de investigadores en el caso de proyectos. En cualquier caso en el número correspondiente se publican los nombres de los responsables. Las opiniones expresadas en los artículos corresponden exclusivamente a sus autores, a los que pertenece la propiedad intelectual del trabajo.

Existen unas normas de admisión y de formato de los trabajos, accesibles en la página web:

<http://www.tecnica-vialibre.es/vltecnica/normaspub.asp>

La revista en formato digital puede ser descargada gratuitamente en:

<http://www.tecnica-vialibre.es/vltecnica/>

**Edita:**

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Secretaría de redacción: Leticia García

ISSN: 2174-0194

El número 3 de la revista *Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria* recoge los trabajos galardonados en el "I Premio Tria Railway RD para Jóvenes Ingenieros Ferroviarios" convocado para artículos basados en los proyectos fin de carrera o fin de Máster sobre temas ferroviarios presentados y aprobados en los cursos académicos 2009-2010 y 2010-2011. A esta primera edición del premio concurren 15 trabajos de 24 autores con trabajos presentados en 7 Escuelas o facultades diferentes. El jurado, de acuerdo con las bases de la convocatoria, escogió dos artículos para los primeros premios y otros 10 artículos que, conforme a lo previsto en las mismas, merecieron certificado de calidad, así como su publicación en la revista *Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria*.

El jurado estuvo presidido por Jaime Barreiro Gil, y formaron parte del mismo como vocales, Andrés López Pita, José Luis López Gómez, Jaime Tamarit Rodríguez y José Luis López Gómez. El Secretario fue José Mariano Rodríguez Martínez.

## Índice

<b>Ingeniería inversa de las estructuras triangulares y del Talgo-I.....</b>	<b>7</b>
Mario Aragón Moya, David Xaubet Martos, Xavier García Torras, Roger Cascante Cirici <i>Universidad Politècnica de Catalunya (Vilanova i la Geltrú)</i>	
<b>Estudio de las repercusiones de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad en obras de permeabilización de la red ferroviaria de interés general española.....</b>	<b>21</b>
Saray Segado Jiménez, María Esperanza Alcover Gil, Pedro Alcover Gil, María Remedios Tormo Climent <i>Universidad Politècnica de Valencia (Valencia)</i>	
<b>Análisis del consumo de energía de trenes de mercancías.....</b>	<b>37</b>
María del Pilar Martín Cañizares <i>Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)</i>	
<b>Estimación del consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> en trenes de mercancías y análisis de la variabilidad.....</b>	<b>51</b>
Ignacio González Franco <i>Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)</i>	
<b>Instalación para el estudio de la propagación de ondas de presión en conductos y su aplicación en túneles para trenes de alta velocidad.....</b>	<b>63</b>
Félix Sorribes Palmer, Oscar López García <i>Universidad Politècnica de Madrid (Madrid)</i>	
<b>Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes.....</b>	<b>79</b>
Diego López Durán <i>Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)</i>	
<b>Estrategia para el mantenimiento de una LAV durante 20 años.....</b>	<b>87</b>
Inés Álvarez Amandi <i>Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)</i>	
<b>Configuración e implantación del sistema ERTMS/ETCS Nivel 1 en el tramo entre Plaza de España-Martorell Enllaç de la línea Llobregat-Anoia de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC).....</b>	<b>99</b>
Pedro de la Rubia Moreno, Alejandro Berenguer Morón, Jordi Ribera Fábregas, Sonia Bernad Bernad <i>Escola Politècnica d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (Barcelona)</i>	
<b>Ventajas de la participación pública en el estudio de alternativas de trazados ferroviarios.....</b>	<b>113</b>
Sofía Agustín Escriche <i>Universidad Politècnica de Valencia (Valencia)</i>	
<b>Alta velocidad y desarrollo urbano. 30 años de experiencia.....</b>	<b>125</b>
Blanca Dómine Chust <i>Universidad Politècnica de Valencia (Valencia)</i>	
<b>Locomotora Naval 1322 de FEVE. Reforma, funcionamiento y prestaciones.....</b>	<b>137</b>
Francisco Barbero Tortosa <i>Universidad Carlos III de Madrid (Madrid)</i>	
<b>Sistema EIDOS.....</b>	<b>149</b>
Francisco Cebrián Gómez <i>Universidad de Castilla - La Mancha (Albacete)</i>	

## Papers

### Reverse engineering of the triangular structures and Talgo I ..... 7

Mario Aragón Moya, Roger Cascante Cirici, Xavi García Torras, David Xaubet Martos. *Universidad Politécnica de Catalunya (Vilanova i la Geltrú)*

Abstract: The present article gathers the substantial of the project of Inverse Engineering on the first prototypes of the triangular system Talgo (Tren Articulado Liger Goicoechea-Oriol): the triangular structure known as Talgo 0 (May 1940) and of the prototype of the train Talgo I (1942).

The Inverse Engineering, done using the scantily existing information, has been carried out to be able to recover information about the forbears of the current train Talgo. This study has lasted for four months and has included different areas: not only a study of design, but also we've done a study of the supposed behavior of the prototypes in route and of the materials' resistance.

The project is useful from a historical point of view to reconstruct with divulgative ends those prototypes. In addition, it tries to help to understand the philosophy with those trains were designed and constructed which innovative characteristics have lasted until the most modern high speed Talgo trains.

Keywords: Talgo, reverse engineering, triangular structures, 3D modeling, reengineering, wheel addressed, finite elements

### Study of the impact of Technical Specifications for Interoperability in permeabilization works on the spanish Railway Network of General Interest ..... 21

María Alcover Gil, Pedro Alcover Gil, Saray Segado Jiménez, María Remedios Tormo Climent. *Universidad Politécnica de Valencia (Valencia)*

Abstract: Technical specifications for interoperability are created in order to ensure interoperability between the railway systems of all the European Union member countries. This study focuses on the specification related to the subsystem of the conventional trans-European rail system by comparing it with the railway permeabilization works, ie underpasses and overpasses on conventional railway platforms, have been designed and built.

Keywords: interoperability, technical specifications, infrastructure, loading gauge, directive, EN 15273, IAPF-2007, IAPF-1975

### Analysis of energy consumption of freight trains ..... 37

M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares. *Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)*

Abstract: This paper presents a tool for converting volumes of demand for goods in units of supply, offering other outcomes such as energy consumption and associated operating costs. It shows a case example made with the tool, in which for an annual load of different products, it is estimated the number of wagons and trains necessary and also it considers the sensitivity to various parameters of the infrastructure and traction.

Keywords: freight trains, energy consumption, costs

### Estimating the energy consumption and emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in freight trains and variability analysis ..... 51

Ignacio González Franco. *Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)*

Abstract: This paper characterizes and compares energy consumption and emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) produced in the transport of freight by rail. Average generic values are often used in estimating the energy consumption of transport modes, but while average values can, with many limitations, be useful in trucks or aircraft, this is not the case on the railway, due to the enormous variability in this consumption. The variability of fuel consumption on the railway is due to the fact that trains are different from each other in size and types of traction (electric or diesel). Furthermore, railways also have important differences, due to the differing severity in profiles, the number of stops and speeds.

This study will demonstrate the variability mentioned, also will indicate which factors cause a variation in energy consumption and emissions of the different freight trains, which are the parameters that have a higher incidence and their order of magnitude.

Keywords: Emissions of CO<sub>2</sub>, net tons; bulk petrochemicals, cars, profile

## Experimental set-up for the study of pressure waves propagation in ducts and its application in tunnels for high speed trains ..... 63

Felix Sorribes Palmer, Oscar López García. *Universidad Politécnica de Madrid (Madrid)*

Abstract: A low-cost experimental facility has been built to perform scale measurements of the pressure waves generated by a high speed train entering inside a tunnel, in order to study possible configurations to reduce the pressure reflected back at the tunnel exit. The reflection coefficient of some tunnel terminations has been measured and the influence of the porosity at the exit has been evaluated by using the Acoustic Pulse Reflectometry method (APR).

Keywords: pressure waves, high speed trains, tunnel

## Study about uses of train regenerated energy ..... 79

Diego Durán López, *Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)*

Abstract: Electric train traction units can behave as generators during brake, transforming part of the kinetic and potential energy into electrical energy.

Once generated, this energy could be used for auxiliary services supplying or other elements of the rail system such as trains, beacons, traffic lights or repair shops. It could be also accumulated during a short period of time or even be returned to the public main.

Furthermore, from the economical point of view, it would be useful to determine the energy savings that would suppose the inclusion of this technology, in order to establish a comparison and identify in each case whether it is advisable to make the necessary investments.

Keywords: Regenerative breaking, energy efficiency

## High speed line maintenance strategy for 20 years ..... 87

Inés Álvarez Amandi, *Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)*

Abstract: The economic crisis in these years requires of the industrial sector and in particular the rail, the introduction of new investment strategies enable them to resist both technological stagnation of investment, as in infrastructure and development. The solution in the Spanish railway sector will be Public - Private Financing (PPP). The project management will have a totally different approach, with the demands of new requirements for reliability and maintenance, so these projects must be conceived with new strategies from the design. The new high speed lines (HSL) in Spain will be associated, with the project, a maintenance contract for twenty years.

Keywords: maintenance, reliability, availability, maintainability, safety, life cycle, updating, replacement, obsolescence, life cycle cost

## Configuration and implementation of ERTMS/ETCS Level-1 system in the section between Plaza España-Martorell Enllaç of the line Llobregat - Anoia of Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC) ..... 99

Pedro de la Rubia Moreno, Alejandro Berenguer Morón, Sonia Bernad Bernad, Jordi Ribera Fàbregas. *Escola Politècnica d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (Barcelona)*

Abstract: Currently the section between Plaza España and Martorell Enllaç of Llobregat-Anoia line of FGC, it is in service as a system Signalling and Train Protection, FAP. This project aims to install on this system, the ERTMS/ETCS Level-1 to achieve an improvement in the control and supervision of the trains. Therefore, the FAP system does not go away, but remains a backup. We will use the different rail that now exist, and will be installed the necessary equipment for the operation of ERTMS/ETCS Level 1. All this with minimal interference in daily train service without substantial modifications to existing facilities.

Keywords: ERTMS, ETCS, Leve-1, FAP, FGC, signalling, train protection, supervision, facilities, daisy service

## Benefits of public participation in the study and design of railroads alternatives ..... 113

Sofía Agustín Escriche. *Universidad Politécnica de Valencia (Valencia)*

Abstract: The main objective of this work is to detect the benefits of integrating public participation in the design of railway lines. To do this, the research technique which has been used is the "case study" (qualitative research) of the high-speed railway between Poitiers and Limoges in France. The research concluded that the integration of public participation in the design of railroads makes to be possible aware of the environment, to optimize the proposed railroads and its corrective measures, to facilitate the election and have "zero statements" in the public information as a legal process. However, if this procedure is used in Spain, we may have better infrastructures adapted to their environment and they should also be more sustainable.

Keywords: public participation, basic project, study, railroad, high-speed railway, public involvement, design, project

**High speed and urban development. 30 years of experiences ..... 125**

Blanca Dómine Chust. *Universidad Politécnica de Valencia (Valencia)*

Abstract: 27th November 2011 marks the 30th anniversary of the arrival of the first high speed train to Lyon Part Dieu Station, built a few years earlier along with a large urban development. In the following years many European cities have had existing stations remodelled or new ones built, all of them have been adapted to the new services. All this operations have led to profound changes in their surrounding areas. This paper analyzes key aspects of 10 of these operations, and highlights the complex analysis and planning processes as a result of the collaboration among rail and transport engineering experts, architects, urban planners and finance specialists.

Keywords: main station, high speed, transport, urban planning, city

**FEVE´s Naval Lomotive 1322. Alteration, operation and performance ..... 137**

Francisco Barbery Tortosa. *Universidad Carlos III de Madrid (Madrid)*

Abstract: The article describes the different phases of the complete alteration of a metric gauge diesel shunting locomotive built in 1966. It also explains the operation of the renovated vehicle and presents the new operating parameters, indicating the most important concepts of the calculation of railway performances.

Keywords: locomotive, FEVE, alteration, performance, shunting

**EIDOS system ..... 149**

Francisco Cebrián Gómez. *Universidad de Castilla - La Mancha (Albacete)*

Abstract: EIDOS system (Computer Equipment Destined for Orientation and Safety) comes from the intention to provide support, on this occasion, to train operators, about the possibility of occurrence of fire near the railway on which the train must move. The priority is to facilitate the machinist the visualization of how the fire develops (as well as other relevant information) using any mobile device. The objective to be achieved is the creation of an interface that should always inform the user in every moment and the most efficient way possible.

Keywords: EIDOS, train, fire, interface

# Ingeniería Inversa de las estructuras triangulares y del Talgo I

## *Reverse Engineering of the triangular structures and Talgo I*

Mario Aragón Moya\*; Roger Cascante Cirici; Xavi García Torras; David Xaubert Martos

*Departamento de Expresión Gráfica, EPSEVG, Vilanova i la Geltrú, 08800, España*

---

### Resumen<sup>(1)</sup>

El presente artículo recoge lo sustancial del proyecto de Ingeniería inversa sobre los primeros prototipos del sistema triangular Talgo (Tren Articulado Ligero Goicochea-Oriol), es decir la estructura triangular conocida como Talgo 0 (Mayo 1940) y del prototipo del tren Talgo I (1942).

Dicha ingeniería inversa, realizada utilizando la escasa información existente, se ha llevado a cabo para poder recuperar información sobre los antepasados de los actuales trenes Talgo. Este estudio ha trascendido durante cuatro meses y ha abarcado diferentes ámbitos, es decir no solo hemos realizado un estudio de diseño, sino que también se ha realizado un estudio del supuesto comportamiento de los prototipos en la vía y un estudio de la resistencia de los materiales.

Sirve desde punto de vista histórico como proyecto para reconstruir con fines museísticos estos prototipos. Además, pretende ayudar a entender la filosofía con la que se diseñaron y construyeron estos trenes cuyas características innovadoras han perdurado hasta los más modernos trenes Talgo de alta velocidad.

Palabras clave: Talgo, ingeniería inversa, estructuras triangulares, modelación 3D, reingeniería, rueda dirigida, elementos finitos

### Abstract

*The present article gathers the substantial of the project of Inverse Engineering on the first prototypes of the triangular system Talgo (Tren Articulado Ligero Goicochea-Oriol): the triangular structure known as Talgo 0 (May 1940) and of the prototype of the train Talgo I (1942)*

*The Inverse Engineering, done using the scantily existing information, has been carried out to be able to recover information about the forbears of the current train Talgo. This study has lasted for four months and has included different areas: not only a study of design, but also we've done a study of the supposed behavior of the prototypes in route and of the materials' resistance.*

*The project is useful from a historical point of view to reconstruct with divulgative ends those prototypes. In addition, it tries to help to understand the philosophy with those trains were designed and constructed which innovative characteristics have lasted until the most modern high speed Talgo trains.*

Keywords: Talgo, reverse engineering, triangular structures, 3D modeling, reengineering, wheel addressed, finite elements

---

<sup>(1)</sup>Estos proyectos los hemos elaborado por separado, diferenciando entre los distintos prototipos comentados anteriormente. El estudio del Talgo-0 realizado por Roger Cascante Cirici y David Xaubert Martos, y paralelamente el del Talgo-I llevado a cabo por Mario Aragón Moya y Xavier García Torras, ambos han sido dirigidos por el tutor e ingeniero de la Universidad Politécnica Superior de Vilanova y la Geltrú (UPC), Juan José Aliau Pons y han sido valorados con una calificación de 10, Matrícula de Honor. Por último, mencionar la ayuda recibida por parte de distintos departamentos de la universidad y de integrantes del mundo ferroviario. Hay que añadir, agradecer y mencionar a los señores José Luis López y Alberto García, Ingenieros Industriales, por la información que nos han podido facilitar a través de conferencias y reuniones para poder consultar, preguntar y aclarar dudas que han ido surgiendo a medida que se iba realizando este proyecto y también a los directores del proyecto Joan Josep Aliau Pons y Maurici Sivatte Adroer.

## 1. Introducción y objetivos

Para poder introducirnos en el contexto histórico de la época y poder situarnos en el entorno de los sistemas ferroviarios que existían en ese momento, empezaremos haciendo referencia a la persona que ingenió el sistema triangular de TALGO, Alejandro Goicochea Omar. El ingeniero y militar español desarrolló su carrera profesional en el ejército e introdujo diversas novedades que cambiarían la industria del ferrocarril. El cambio más destacado fue la introducción del conocido como sistema triangular y rueda independiente dirigida en sus primeros ensayos acabando con los antiguos y pesados sistemas bogie.

Tal y como acabamos de mencionar, a partir de estos primeros prototipos, se fueron construyendo durante las siete siguientes décadas y hasta la actualidad diversas generaciones de trenes Talgo que han ido incorporando nuevas soluciones tecnológicas, pero a la vez manteniendo los llamados “principios tecnológicos Talgo” ya presentes en estos prototipos y entre los cuales se pueden mencionar como más representativos las ruedas libres sin eje montado, el bajo centro de gravedad, el piso bajo, arquitectura articulada de tipo triangular con coches cortos.

Esta iniciativa nace de la voluntad de Talgo y Renfe por recuperar los proyectos innovadores de las estructuras triangulares (“Talgo 0”) y del Talgo I, ideados por Alejandro Goicochea Omar. Actualmente, apenas se conservan documentos sobre el <<tren oruga>>, nombre por el que era conocido en la época, y cada vez son menos los testimonios a los que poder consultar. Veinte fotografías y diez artículos son el único material existente sobre un proyecto que revolucionó la historia del ferrocarril e hizo evolucionar al singular tren hasta llegar al que conocemos hoy en día.

En base a la poca información existente, y a partir de una ingeniería inversa sobre los dos prototipos, se han ido diseñando las diferentes piezas y componentes que formaban los diferentes sistemas. Para obtener un resultado lo más fidedigno posible hemos utilizado técnicas de dibujo como la perspectiva cónica para poder deducir las principales medidas del prototipo, partiendo de una longitud conocida.

Con este proyecto se ha pretendido buscar soluciones de diseño, teniendo en cuenta la época en que fueron construidos dichos prototipos. Por lo tanto se han analizado cuáles serían las opciones constructivas habituales en la época, qué materiales se utilizaban y qué tipos de soldaduras eran habituales.

Siempre se han buscado soluciones funcionales, que cumplan con el diseño observado en las fotografías y que no repercutan un coste desmesurado.

En muchos casos la información de las fotografías era incompleta ya que la calidad de las mismas no era la suficiente y en otras ocasiones el ángulo de la fotografía no permitía apreciar según que detalles. Por este motivo nos vimos obligados a realizar hipótesis varias basadas en el pensamiento de Goicochea deducido de sus escritos, siempre de una manera coherente y razonable. Para ello realizamos varias visitas al museo del ferrocarril de Vilanova y la Geltrú donde se encuentra una de las únicas unidades conservadas del Talgo II, ya que era la evolución conservada más próxima a los sistemas a estudiar. Además, nos hemos podido apoyar en los conocimientos de expertos en el mundo ferroviario.

### Estructuras triangulares (“Talgo 0”)

El objetivo principal de este proyecto es explicar de forma detallada, las ventajas de la estructura triangular respecto al bogie convencional, tanto teórica como matemáticamente.

### Talgo I (“El tren oruga”)

El objetivo principal de este proyecto es realizar unos modelados en tres dimensiones mediante el programa Catia V5R18 de los diferentes elementos funcionales para dejar constancia de sus geometrías y dimensiones.



## 2. Estudio y búsqueda de información

Para poder llevar a cabo los procesos de Ingeniería Inversa primero tuvimos que documentarnos, recopilando los diez artículos hallados [1] a [14] donde se hacía mención los sistemas a estudiar y de los que pudimos extraer 20 fotografías lo suficiente claras como para usarlas de punto de partida. Merece especial mención el artículo de Manuel Galán Eruste [5] que es el único que muestra los esquemas acotados del Talgo I.

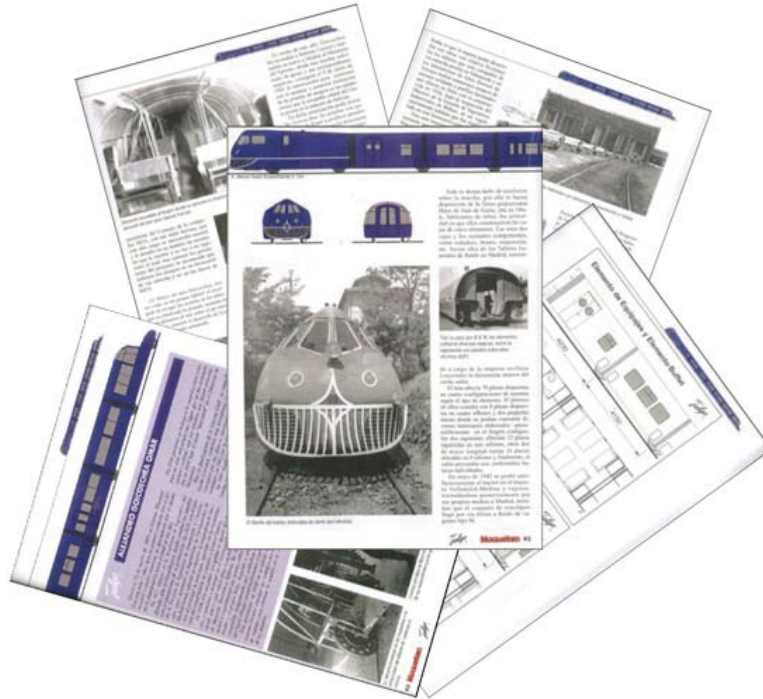


Fig. 1. Recopilación de documentos de la revista Maquetren

## 3. Obtención de características técnicas y geométricas

En el momento de iniciar la reconstrucción de los prototipos de las estructuras triangulares (“Talgo 0”) y del Talgo I, nos dimos cuenta que nos faltaba documentación funcional, por lo tanto nos vimos obligado a utilizar una técnica de expresión gráfica conocida como, “perspectiva cónica” para poder sustraer todas las medidas necesarias para la reconstrucción. Para ello, en el caso de las estructuras triangulares usamos la única medida que conocíamos con seguridad (anchura de la vía).



Fig. 2. Anchura de vía

El siguiente paso fue escoger la imagen más nítida para poder efectuar esta técnica de dibujo.



Fig. 3. Documento fotográfico estructura triangular

Una vez seleccionada, buscamos los puntos de fuga de la imagen y a partir de aquí trazamos una serie de líneas, círculos y arcos de circunferencia que más tarde nos permitiría saber cuáles eran las dimensiones de la estructura.

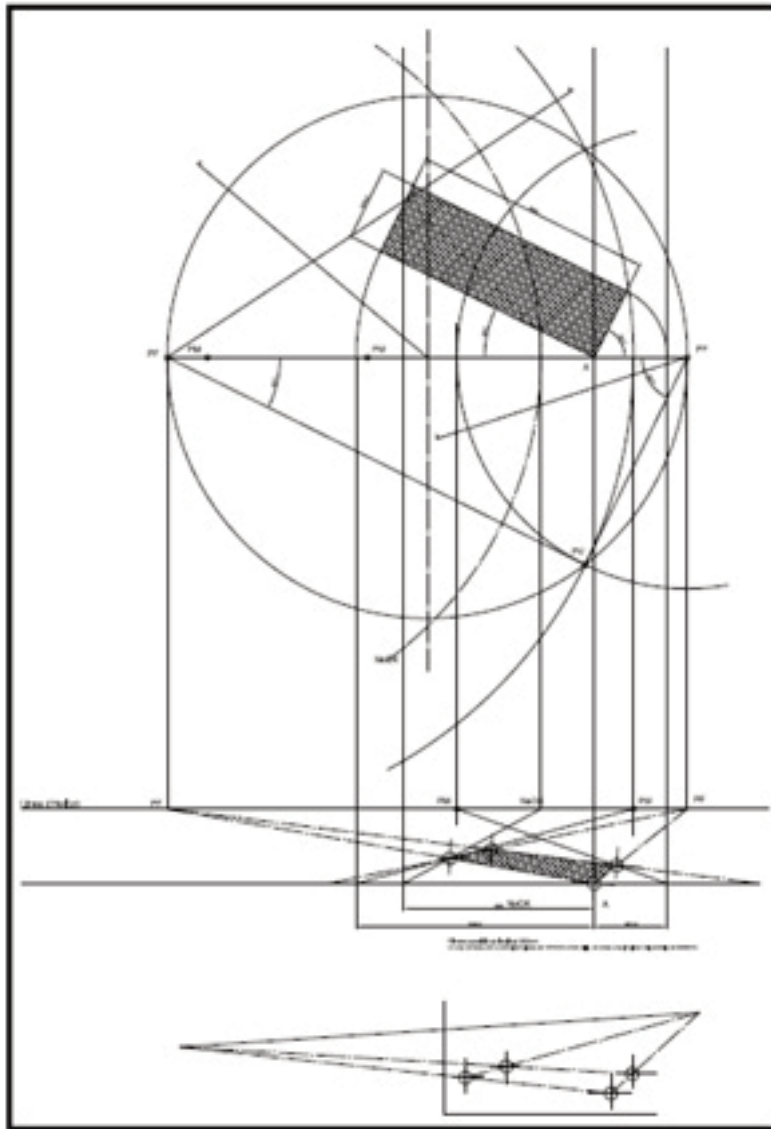


Fig. 4. Método Cónica

Sustraídas las medidas funcionales de la estructura, procedimos a calcular el resto de longitudes. Para ello, utilizamos la proporcionalidad, comparando medidas reales con medidas ficticias sustraídas a través de la imagen.

En cambio, para el Talgo I utilizamos el mismo método de dibujo para la sustracción de medidas, pero en este caso la referencia era el diámetro exterior de la rueda ya que era una medida conocida (800mm).

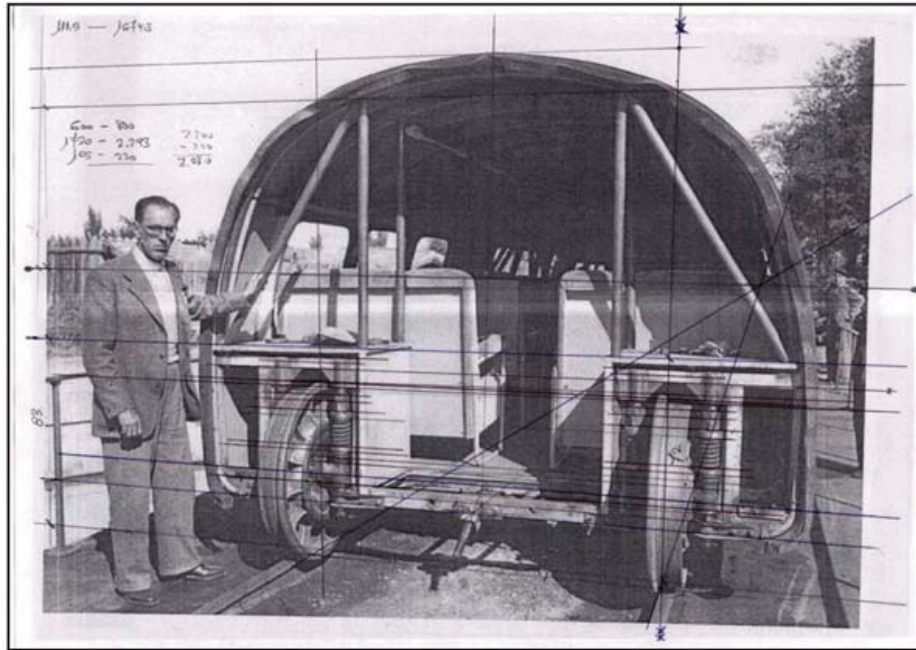


Fig. 5. Método cónica 2

En este caso trazamos una línea vertical de referencia y con el trazo de líneas en diferentes sentidos obtuvimos las medidas de los principales elementos de la estructura.

Para conseguir las medidas de la rueda utilizamos la siguiente imagen, donde se pueden ver mejor las geometrías que la formaban.



Fig. 6. Perspectiva cónica usada sobre la imagen

## 4. Modelado

Una vez obtenidas las medidas con el proceso mencionado anteriormente procedimos a realizar el diseño en 2D a través del software informático “AutoCAD”. De esta manera pudimos representar todas y cada una de las piezas en diferentes planos.

### 4.1. Estructuras triangulares (“Talgo 0”) (2D)

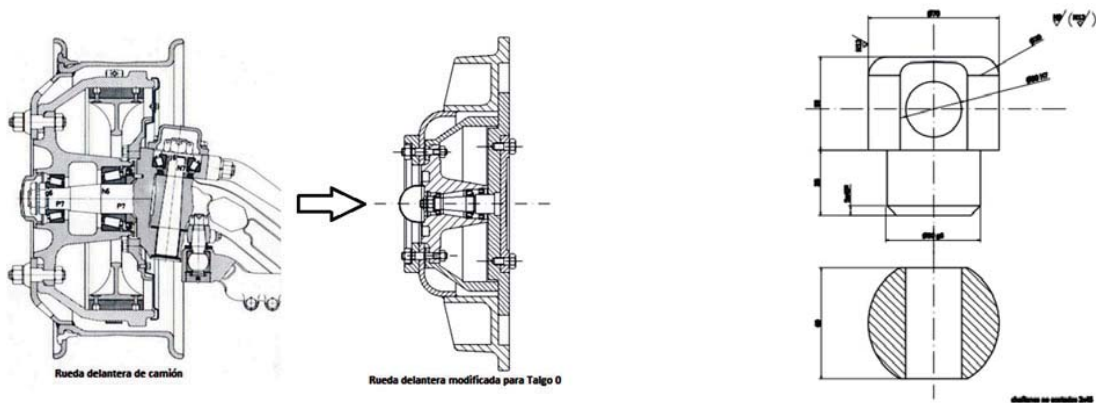


Fig. 7. (a) Rueda delantera de camión vs llanta talgo; (b) Detalle tapones unión biga-estructura. 2D

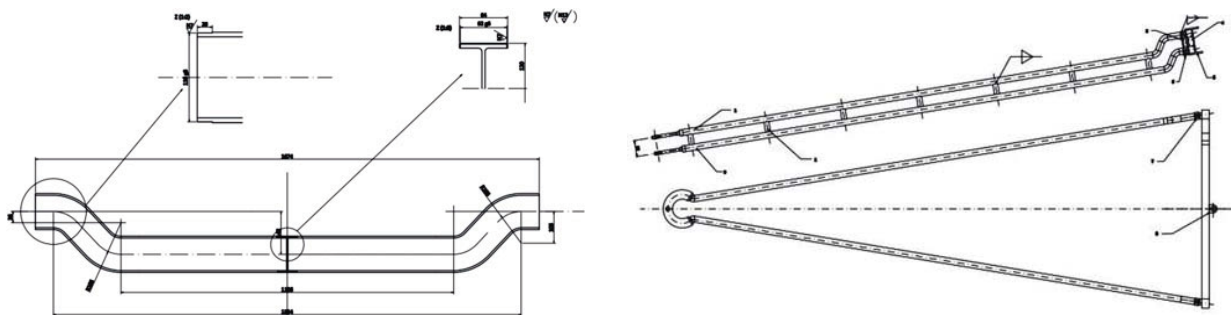


Fig. 8. (a) Biga IPE- eje rueda. 2D; (b) Estructura triangular. 2D

### 4.2. Talgo I (2D)

De los planos en 2D pudimos obtener las dimensiones y posiciones de ventanas, puertas y trampillas escamoteables.

En algunas imágenes en las que se podía apreciar la estructura tubular autoportante, pudimos observar cómo era la distribución de los tubos que la formaban, así que para acabar de concretar la distribución usamos los planos en 2D y situamos los tubos para obtener medidas de referencia.

En la imagen se puede apreciar cómo los cuatro vagones contienen nueve tubos cada uno y distribuidos dependiendo de los espacios vacíos que contienen los vagones.

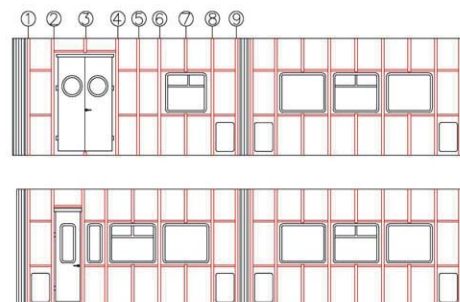


Fig. 9. Razón de la distribución tubular (rojo)

A continuación transferimos todos los planos de dos dimensiones a un formato 3D, obteniendo una visualización más real de cada elemento. Una vez diseñados todos los componentes procedimos a ensamblar las diferentes partes que formaban la estructura. Obteniendo un resultado tal como se muestra en las siguientes figuras.

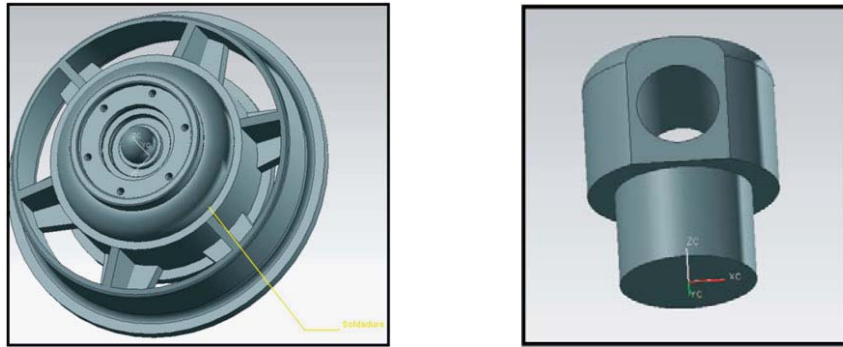


Fig. 10. (a) Rueda de Camión vs llanta talgo; (b) Detalle Tapones unión biga-estructura. 3D

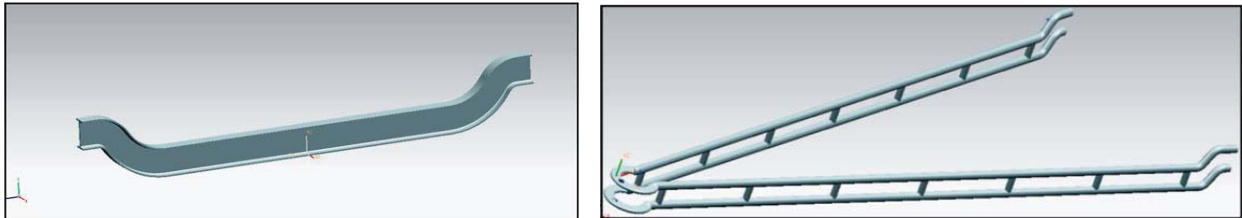


Fig. 11. (a) Biga IPE- eje rueda. 3D; (b) Estructura triangular. 3D

#### 4.3. Estructuras triangulares (“Talgo 0”) (3D)

Finalmente procedimos al encaje de todas las piezas con el resultado que vemos a continuación.



Fig. 12. Prueba de las estructuras modeladas en un entorno real

#### 4.4. Talgo I (3D)

Obtenidas las medidas aproximadas, las exactas, los planos y la distribución tubular, procedimos a modelar en tres dimensiones con el programa “CATIA V5R18” todos los componentes que formaban los cuatro vagones elegidos del Talgo I.

Para modelar todas y cada una de las piezas, las distribuimos en subconjuntos dependiendo de la función que tenían en cada vagón. A continuación aparecen las imágenes de las partes más representativas de los vagones y, en algunas de ellas, el peso y una cota máxima para ver las diferencias de tamaño entre ellas.

*Fig. 13. Estructura tubular elemento "buffet"*

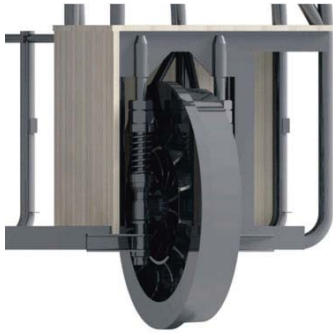


Longitud máxima: 4000 mm; Peso: 270 Kg

En función de los planos en 2D y de los alzados de los vagones, hicimos una distribución tubular que posteriormente tomaría formato en 3D.

La estructura tubular estaba formada por tubos de perfil circular en mayoría y perfil rectangular. Era del tipo autoportante.

*Fig. 14. Conjunto sistema de rodadura*



Diámetro de rueda: 800 mm

A partir de las diferentes imágenes halladas en los artículos pudimos apreciar las formas y geometrías de las piezas que componían el sistema de rodadura y a continuación se pueden observar por separado.

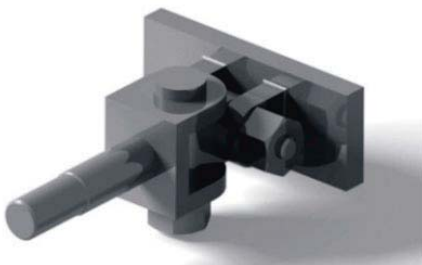
*Fig. 15. Eje de rueda*



Longitud máxima: 183.3 mm

En base a la rueda diseñada y a la pieza guía del amortiguador, modelamos un eje que se pudiera unir a los amortiguadores de ambos lados de la rueda y sujetarla.

*Fig. 16. Conjunto de unión entre vagones*



Longitud máxima: 278.5 mm; peso conjunto: 8 Kg

Para poder unir cada vagón con el contiguo se usaba un conjunto de piezas que los unía mediante un eje roscado.

*Fig. 17. Rueda*



Diámetro: 800 mm; peso: 150 Kg

En función de las medidas obtenidas y las geometrías observadas en la imagen de la parte trasera del tren, procedimos a diseñar la rueda tal y como aparece en la figura.

Fig. 18. Escuadra soporte inferior amortiguador



Altura máxima: 60 mm

Para poder sujetar el amortiguador por la parte inferior a la estructura tubular aparece dicha escuadra en las imágenes. Estaba formada por una pletina doblada, un cilindro soldado a ésta y dos pletinas, una en la parte superior y otra en la inferior, soldadas a todo el conjunto. Uno por amortiguador.

Fig. 19. Amortiguador



Altura máxima: 725 mm; peso conjunto: 20 Kg

A partir de las imágenes observamos que cada vagón contaba con cuatro amortiguadores, dos a cada lado de las ruedas.

Dichos amortiguadores estaban formados por una barra vertical roscada por la parte superior y taladrada por la inferior, dos tuercas, una de apriete y una de fijación, cuatro arandelas, una guía que se sujetaba al eje de la rueda, un tope, y una tuerca agujereada como la barra vertical.

Fig. 20. Soporte superior amortiguadores



Altura máxima: 687mm; peso: 14 Kg

Para poder montar los amortiguadores en la estructura tubular hacía falta un soporte como el de la figura en cada habitáculo de la parte trasera del vagón. Dicho soporte hemos supuesto que estaba formado por varias piezas soldadas. Uno por cada dos amortiguadores.

Fig. 21. Caja cubre-habitáculo para sistema de rodadura



Altura máxima: 707.018mm

En las imágenes se puede ver que, por seguridad, los habitáculos que albergaban el sistema de rodadura, estaban cubiertos cada uno por tres tablones de madera, como se puede apreciar en la imagen de la derecha.

Fig. 22. Mesa elemento "buffet"



Además el vagón "buffet" contaba con 2 mesas centradas, una a cada lado del vagón.



Fig. 23. Asiento elementos de 12 plazas

Ambos vagones, de doce plazas cada uno, estaban compuestos por 6 asientos dobles cada uno, como el de la imagen.



Fig. 24. Asientos elemento "buffet"

El vagón buffet estaba compuesto por 4 asientos dobles como el de la imagen.

En las siguientes imágenes se puede observar el resultado final obtenido tras todos los cálculos y proceso de diseño pertinentes. Las instantáneas muestran los vagones de pasajeros, el de "buffet" y el de equipaje, los cuatro diseñados primeramente en 2D y finalmente en 3D, con CATIA V5R18.



Por falta de información no se ha podido detallar los aseos



Contenía: 4 asientos, 2 mesas pupitre

Fig. 25. (a) Vagón equipajes 3D; (b) Vagón buffet. Capacidad para 8 pasajeros. 3D



Contenía 6 asientos dobles



Contenía 6 asientos dobles

Fig. 26. (a) Vagón 12 plazas delantero. Capacidad para 12 pasajeros. 3D; (b) Vagón 12 plazas trasero. Capacidad para 12 pasajeros. 3D



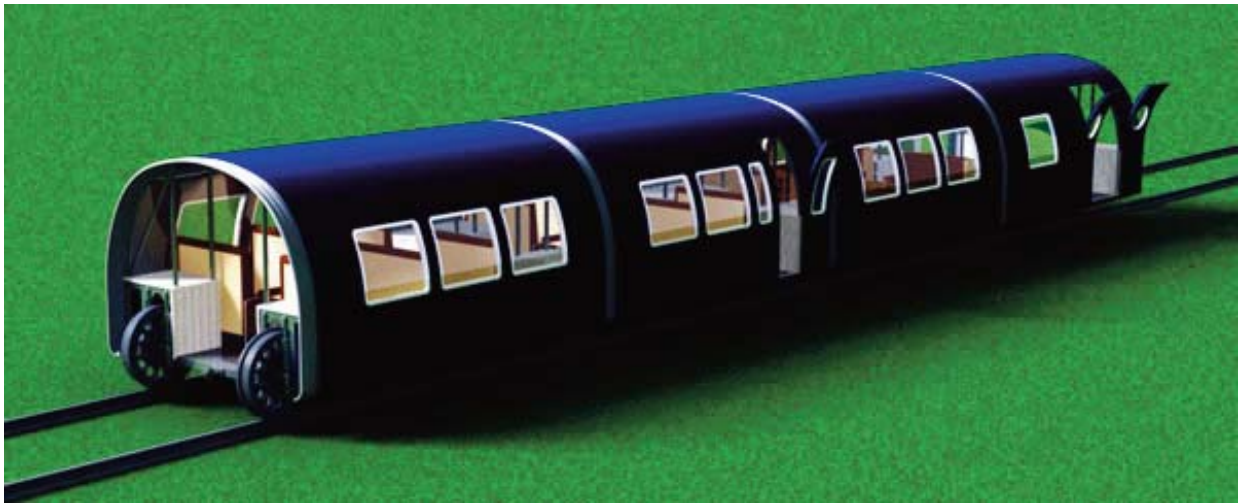


Fig. 27. Conjunto de los cuatro vagones sobre carriles, 3D

## 5. Detalles constructivos y para la fabricación

Una vez modeladas todas las piezas, procedemos a describir los materiales utilizados y los posibles procesos de fabricación que se podrían haber utilizado en la época para su obtención. El criterio que hemos seguido para detallar cada uno de los distintos procesos se ha basado en las diferentes geometrías que caracterizaban cada una de las piezas y los materiales con los cuales estaban compuestos.

Por lo que se refiere a los materiales utilizados, podemos distinguir tres clases. Por una parte tenemos los tubos de acero huecos que podían ser de perfil circular o rectangular; Por otra parte, también hemos considerado tubos de acero macizos de perfil circular o en prisma; Por último, hay que comentar que la chapa utilizada para cubrir los vagones procedía de rollos de chapa laminados.

En cuanto a los distintos procesos de fabricación que hemos tenido en cuenta para la elaboración de los diferentes componentes de los vagones, podemos observar distintos tipos según la geometría que queríamos obtener, o el material con el cual estaban fabricados.

Uno de los procesos mas empleados hemos considerado que ha sido el torneado, utilizado en aquellas piezas que contenían **geometrías cilíndricas** y que mediante un **torno**, daban la forma que caracterizaba la pieza definida. Otro de los procesos más utilizados para mecanizar los componentes era el fresado, y que se utilizaba para piezas cuyo **corte** era en **dirección recta** y se consideraba necesario que fuera bastante preciso.

También, cabe destacar, métodos mas sencillos como pueden ser el taladro, para las piezas que contenían agujeros (ya fueran pasantes o no); el tronzado, para cortar los tubos y obtener la longitud exacta que se necesitaba; el serrado, para cortar las pletinas; o el roscado, para las piezas que interior o exteriormente necesitaban de una unión roscada para poder unir las a otras.

Es importante resaltar que para los agujeros hechos sobre los tubos de perfil circular, hemos supuesto que se podía haber utilizado como soporte algún tipo de **utillaje centrador** para producir el agujero correctamente.

## 6. Cálculos

### 6.1. Talgo 0

En este apartado, hicimos un estudio dinámico comparativo entre los dos sistemas mencionados anteriormente. Logramos un resultado satisfactorio ya que se demostró que el sistema Talgo era más difícil de descarrilar, ya que actúa una fuerza en el mismo sentido que el peso que favorece el agarre en el paso por curva.

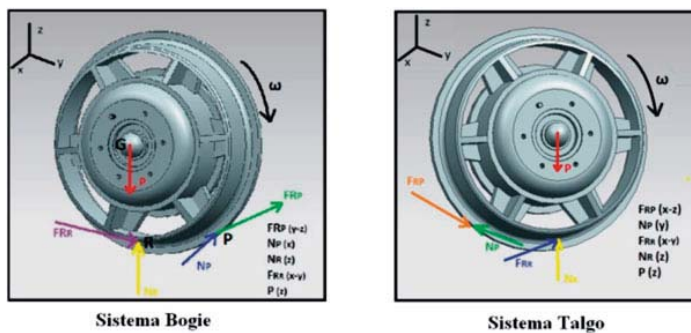


Fig. 28. (a) Diagrama Cuerpo Libre Bogie; (b) Diagrama Cuerpo Libre Talgo

Para finalizar este apartado se realizó una simulación mediante elementos finitos del eje de la estructura, de esta manera se observó el comportamiento de éste, soportando una carga estática simulada.

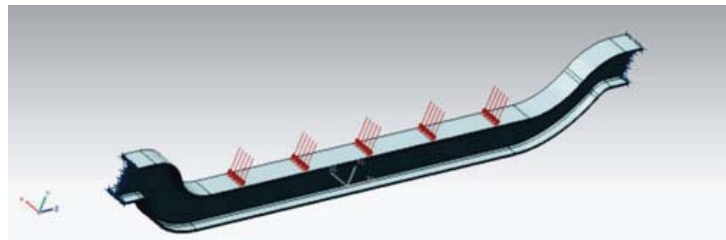


Fig. 29. Carga aplicada en el eje

### 6.2. Talgo I

Finalizadas todas las piezas a modelar, calculamos mediante el módulo de Simulación de elementos finitos de CATIA V5R18, si las diferentes estructuras tubulares estarían capacitadas para resistir los hipotéticos esfuerzos aplicados.

Para comprobar si tal y como estaban definidas resistirían a las cargas aplicadas, hemos supuesto el caso más desfavorable, en el cual hubiera una catástrofe y los pasajeros tuvieran que agruparse en un solo vagón hasta su ocupación completa.

Hay que decir que el material utilizado para las simulaciones ha sido el AISI 1015, el respectivo al acero F1 de la época.

### Cálculos justificativos

Previamente a los cálculos de las estructuras, seleccionamos una de las piezas del tren para llevar a cabo una comprobación y poder verificar si los resultados obtenidos eran fiables. La pieza seleccionada para la comprobación fue el eje roscado del conjunto de unión entre vagones y procedimos a comprobar el desplazamiento o incremento de longitud al aplicar el esfuerzo de tracción (30kN) producido por la locomotora en el tramo central del eje roscado que vemos en la siguiente imagen (a).

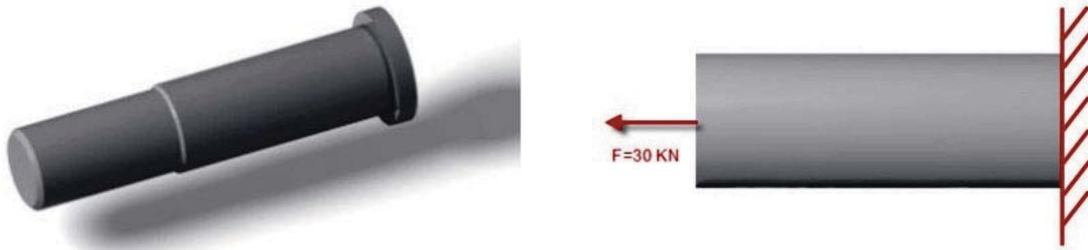


Fig. 30. (a) Eje roscado del conjunto de unión entre vagones; (b) Tramo central del eje con la fuerza aplicada: 30kN

### Simulaciones de las estructuras

Por lo que respecta a las simulaciones de la capacidad resistente de las estructuras, hay dos tipos de ensayos, una con el peso de los vagones y otra añadiendo el peso de los viajeros.

En el caso de considerar tan solo el hecho de la carga de las estructuras, solamente aplicamos como esfuerzo la tara de los diferentes vagones. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 1. Resultados obtenidos en las simulaciones

Descripción	Tensión de Von Mises	Desplazamiento
Elemento equipajes	287 MPa	11,2 mm
Elemento “buffet” y 12 plazas trasero	285 MPa	9,91 mm

Si se diera el caso de que alguna de las estructuras no fuera fiable creemos que el factor que determina los valores de las tensiones de Von Mises ha sido el mínimo espesor escogido para todos los tubos que forman la estructura tubular.

Así pues, creemos que para reducir su valor una de las posibles mejoras que se podría llevar a cabo era la modificación del factor espesor de los tubos de la estructura, dotándola de una mayor resistencia. Además siendo la parte inferior de la estructura la más débil, si se diseñaran unos tirantes para reforzarla creemos que sería más resistente en la base.

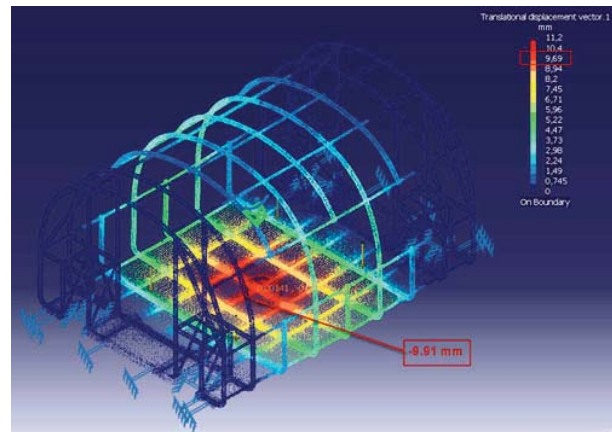


Fig. 31. Esfuerzos aplicados en la estructura tubular del elemento buffet

## 7. Conclusiones

En este proyecto de ingeniería inversa sobre el Talgo 0 y I nos hemos enfrentado a una situación compleja. Físicamente no disponíamos del producto para poder realizar dicho estudio y esto ha comportado que toda la información a nuestro alcance procediese de la antigua y escasa documentación fotográfica que nos proporcionaron el Sr Alberto García y del Sr José Luis López, dos profesionales del mundo ferroviario además de alguna documentación de la época.

Con la información recopilada, intentamos rediseñar y construir ciertos componentes, teniendo en cuenta la situación de la industria española de los años cuarenta en plena posguerra, en una situación de plena autarquía,

donde no eran posibles las importaciones y con la dificultad añadida de que coincidía con la Guerra Mundial. Esta dificultad nos ha servido para situarnos en el entorno de los años 40 e investigar los procesos de construcción, para poder llevar a cabo con mayor exactitud la reconstrucción de la estructura tubular del Talgo 0.

Aparte de rediseñar dicha estructura, también realizamos estudios de elementos finitos a través de los softwares, lo que nos ha enriquecido a nivel conceptual e informático, por lo tanto hemos podido llevar a cabo una construcción de los años 40 a la época actual. Asimismo hicimos un estudio dinámico comparativo entre el sistema Talgo y el sistema de bogie convencional.

También hemos de mencionar que a medida que hemos ido realizando este proyecto han ido apareciendo diferentes dificultades de distintos tipos, pero poco a poco se han ido subsanando hasta poder llegar a realizar por completo el proyecto.

Finalmente nos gustaría agradecer a todas las personas involucradas de manera indirecta en este proyecto, tales como: técnicos expertos en el mundo ferroviario, profesores de diferentes departamentos de la universidad, empresas de construcción, etc. Que gracias a todos ellos se ha podido llevar a cabo este proyecto de una manera precisa y satisfactoria.

## Referencias

- [1] Archilla Aldeanueva, F.: “Primeras ideas, “Talgo 0” y Talgo I”. Extraído de: Evolución técnica de Talgo. Publicado en: Manual para la formación del personal de “Patentes Talgo”. 2000
- [2] Cano López-Luzzati, M. y Galán Eruste, M.: “Talgo I”. Extraído de: Talgo 1942-2005. De un sueño a la alta velocidad. Publicado en: Revistas Profesionales S.L. 2006
- [3] Cano, M., Galán, M.: “El Talgo I”. Publicado en: Fascículos Colección Talgo, fasc. 4, 5 y 6. Ediciones Altaya 2006
- [4] Carlos Laviana, J.: (ed.). “Talgo I”. Extraído de: 1950 Las estrellas llegan a España. Se acabó el aislamiento. Publicado en: Col. El franquismo año a año. Nº 10; Unidad Editorial S.A., Madrid, 2006
- [5] Galán Eruste, M.: “Talgo I, un tren diferente”. Publicado en: Documentos Maquetrén
- [6] Gallardo, J.M.: “El Talgo I”. Publicado en: Carril, nº 9, septiembre de 1984
- [7] Goicoechea Omar, A.: “El Talgo”. Publicado originalmente en: Motor Mundial, nº ago. Y sep. 1944. Editado por Motor Mundial, Tomo 2, nov. 1949
- [8] Goicoechea Omar, A.: “El tren español: nueva orientación ferroviaria”. Publicado originalmente en: Imprenta del Najzen, 1950. De esta edición, facsímil editado por IberCaja, Zaragoza, 1995
- [9] López Pita, A.: “Infraestructuras ferroviarias” Barcelona: Edicions UPC, 2006.
- [10] López Pita, A.: “Talgo y la alta velocidad”
- [11] Lucchesi, D.: “Tecnología de los materiales de taller”. Editorial Labor, 1973.
- [12] Luis Díaz, Á.: “Gestación y Construcción del tren Talgo I”. Publicado en Vía Libre, nº 443, junio 2001.
- [13] Luis Rodríguez, Á.: “Renfe construyó en Valladolid la primera “locomotora” Talgo”. Publicado en: Vía Libre, nº 449, enero de 2002
- [14] Tuñón de Lara, M.: “El primer franquismo: España durante la segunda guerra mundial”. Madrid: Siglo XXI editores S.A, 1989

## Estudio de repercusiones de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad en obras de permeabilización de la red ferroviaria de interés general española

### *Study of the impact of Technical Specifications for Interoperability in permeabilization works on the spanish Railway Network of General Interest*

María Alcover Gil<sup>1</sup>, Pedro Alver Gil<sup>2</sup>, Saray Segado Jiménez\*<sup>3</sup>, María Remedios Tormo Climent<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dirección General de Transporte y Logística, Conselleria de Infraestructuras Territorio y Medio Ambiente, Valencia, 46010 España

<sup>2</sup>Departamento de construcción, APPLUS+, Paterna (Valencia), 46980 España

<sup>3</sup>Dirección General Obras Públicas, Proyectos Urbanos y Vivienda, Conselleria de Infraestructura Territorio y Medio Ambiente, Valencia, 46010 España

<sup>4</sup>Ingeniero Técnico de Obras Pública (autónoma), Ayuntamiento de Rafelguaraf, Rafelguaraf (Valencia), 46666, España

---

#### Resumen

Las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad se crean con el objetivo de garantizar la interoperabilidad entre los sistemas ferroviarios de los estados miembro de la Unión Europea. Este estudio se centra en la especificación relativa al subsistema infraestructura del sistema ferroviario transeuropeo convencional realizando una comparación de la misma con el modo en que han sido proyectadas y construidas las obras de permeabilización ferroviarias, es decir, pasos inferiores y superiores a plataformas ferroviarias convencionales.

Palabras clave: interoperabilidad, especificación técnica, infraestructura, carga, gálibo, directiva, EN 15273, IAPF-2007, IAPF-1975.

#### Abstract

*Technical specifications for interoperability are created in order to ensure interoperability between the railway systems of all the European Union member countries. This study focuses on the specification related to the subsystem of the conventional trans-European rail system by comparing it with the railway permeabilization works, ie underpasses and overpasses on conventional railway platforms, have been designed and built.*

*Keywords: interoperability, technical specifications, infrastructure, loading gauge, directive, EN 15273, IAPF-2007, IAPF-1975*

---

### 1. La Red Transeuropea de ferrocarril: el objetivo de las especificaciones técnicas de interoperabilidad

La interoperabilidad en el transporte, y concretamente en el transporte ferroviario, se refiere a la garantía de circulación de los trenes pertenecientes a los países miembro por cualquier tramo de la red ferroviaria de la Unión Europea. El primer momento en que se habla de este término es en 1991, cuando se firma la Directiva 91/440/CEE sobre el desarrollo de los ferrocarriles comunitarios. Esta directiva, mencionaba la necesidad de las empresas ferroviarias de tener un mayor acceso a las redes ferroviarias europeas en pro de garantizar la libre circulación de trenes por el territorio de la Unión.

Para ello, era necesaria la definición de una normativa europea común que permitiera la normalización tanto en la construcción como en la explotación de las plataformas ferroviarias. El principal obstáculo con el que se enfrentaba, y se enfrenta, la interoperabilidad era la red ferroviaria existente, ya que la mayor parte de la misma fue construida antes de la creación del marco común normativo europeo, lo que conlleva que, para la unificación,

todos los países miembro tengan que revisar sus infraestructuras. De esta manera, se responderá, además de a las directivas del parlamento, al objetivo establecido ya en 1986, de la creación de un marco común para los estados miembros que permita la creación de un área sin fronteras, en primer lugar para las personas; en segundo lugar, para las mercancías; en tercer lugar, para los servicios; y en cuarto y último lugar para los capitales.

### 1.1. Las especificaciones técnicas de interoperabilidad

Para permitir la interoperabilidad del sistema ferroviario, se crean especificaciones técnicas de interoperabilidad, en adelante ETI, que se aplican a los diferentes subsistemas que lo componen, dividiéndose así en un total de siete: infraestructuras, energía, control-mando y señalización, material rodante, explotación y gestión del tráfico, mantenimiento y aplicaciones telemáticas al servicio de los pasajeros y del transporte de mercancías. De esta manera, la UE legisla por subsistemas redactando directivas o decisiones.

La primera de las ETI en surgir, fue la del subsistema infraestructura relativa al sistema ferroviario transeuropeo de Alta Velocidad, prioritaria debido al gran auge de la Alta Velocidad en la década del 2000-2010. En 2011, el subsistema queda completamente definido con la publicación de la otra parte de esta especificación, relativa al sistema ferroviario transeuropeo convencional.

El subsistema infraestructura engloba las obras civiles necesarias para la materialización de la plataforma ferroviaria, así como los equipos de vía, la vía tendida y las infraestructuras asociadas en las estaciones.

Con la finalidad de permitir la interoperabilidad a un coste razonable en términos económicos, se realiza una clasificación de las líneas ferroviarias de la red TEN según el concepto de “Categoría de línea ETI”. De este modo se tienen tres categorías para las líneas de Alta Velocidad: I, II y III, y cuatro categorías para las convencionales: IV, V, VI y VII, que tienen en cuenta, además, factores como el tipo de tráfico (viajeros, mercancías y tráfico mixto), la carga por eje, el gálibo y la velocidad. Dichos factores engloban lo especificado en la norma EN 15528:2008, la cual propone diferentes modelos de carga, en función de la carga por eje que transmite el vehículo ferroviario y la velocidad a que vaya a circular.



Fig. 1. Mapa de la Red TEN. Fuente: Ministerio de Fomento 2011<sup>1</sup>

<sup>1</sup> La red TEN es la Red Transeuropea definida por la Unión Europea. Las líneas principales son los grandes corredores que conectan Europa y las otras líneas son la red global incluida en la red TEN de líneas nacionales y regionales, que conectan con la red principal.

### 1.2. Gálibos y cargas como factores determinantes en la revisión de la infraestructura existente

La ETI de infraestructura hace referencia a cuatro tipos de gálibos G1, GA, GB y GC, que para las partes bajas es común para todos y para las partes altas es para las que difiere, incrementándose desde el GA hasta llegar al máximo posible, el GC, que ha de garantizar toda la infraestructura nueva. Así, el mayor gálibo permitirá no solo el paso de vehículos ferroviarios más grandes sino vehículos ferroviarios cuya combinación de carga, velocidad y tráfico esté dentro del contorno del gálibo definido como estándar.

Cada uno de ellos define un contorno con la envolvente de las posibles posiciones que podría ocupar un vehículo ferroviario, tanto en movimiento como parado, sobre la vía. Esto supone tomar el contorno del vehículo ferroviario e incrementarlo con unas ampliaciones laterales, tales como las desviaciones adicionales debidas a la variabilidad en curva, las que son consecuencia del efecto cuasiestático producido por el balanceo de la caja y las debidas a fenómenos aleatorios; y perpendiculares, correspondientes al efecto vertical del balanceo y el rebote vertical.

Las cargas que definen la capacidad portante de las estructuras que tengan que resistir el paso de los vehículos ferroviarios son las correspondientes al tren de carga asociado al vehículo ferroviario que por esas vías vaya a pasar. La ETI define unas cargas por eje para los vehículos de 20, 22,5 y 25 toneladas.

Las siguientes gráficas muestran, en resumen, en función del tipo de tráfico al cual se pretende atender, el estándar hacia el que nos conducimos con la aplicación de las ETI, así como la combinación de los factores antes mencionados.

Para el tráfico de viajeros, tal como se puede apreciar en la figura 2, el cumplimiento de los requisitos establecidos por la ETI produce que la infraestructura pueda permitir un incremento considerable en velocidad de 50 km/h para la categoría de línea ETI más exigente, pasando así de 150 a 200 km/h, así como otro aumento de la longitud del tren en 100 metros, aumentando la capacidad de los vehículos ferroviarios con el fin de reducir, en la medida de lo posible, el transporte por carretera.

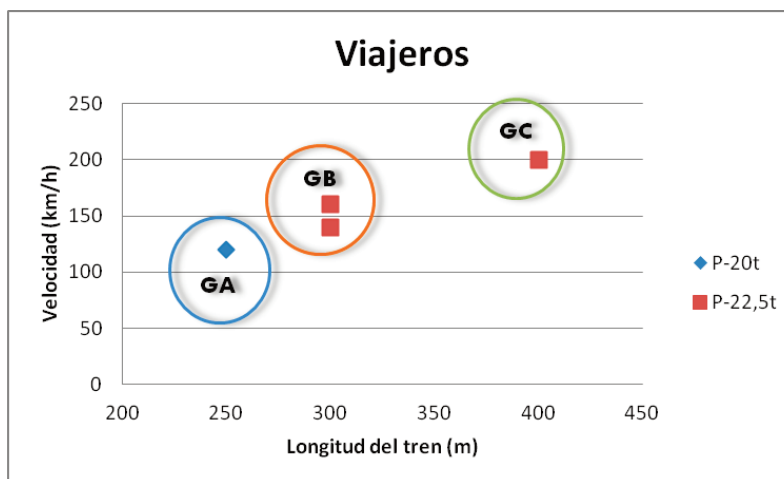


Fig. 2. Gráfica que recoge los requerimientos del establecidos por la ETI de infraestructuras para viajeros en su apartado 4.2.1.. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3 y en cuanto al tráfico de mercancías, se aprecia como, en el caso de las líneas nuevas de la red TEN, para las que se exige que la infraestructura resista una carga por eje equivalente a 25 toneladas, los requerimientos que han de cumplir es que permitan el paso de trenes, de hasta 750 metros de longitud, a una velocidad de 140 km/h. Esto implica que el gálibo de su contorno cinemático esté dentro del gálibo del contorno de referencia GC. El cumplimiento de lo anterior representa una variación considerable con respecto al cumplimiento de un gálibo GB en cuanto a que representa un incremento en 40 km/h de la velocidad de cruce y de 150 metros en la longitud del vehículo ferroviario.

Estos datos son reveladores, puesto que evidencian un claro incremento de prestaciones que a su vez conlleva una reducción de los efectos perjudiciales del exceso de transporte por carretera. De este modo, la Unión Europea garantiza la interoperabilidad y además contribuye a la reducción de la emisión de gases contaminantes a la atmósfera.

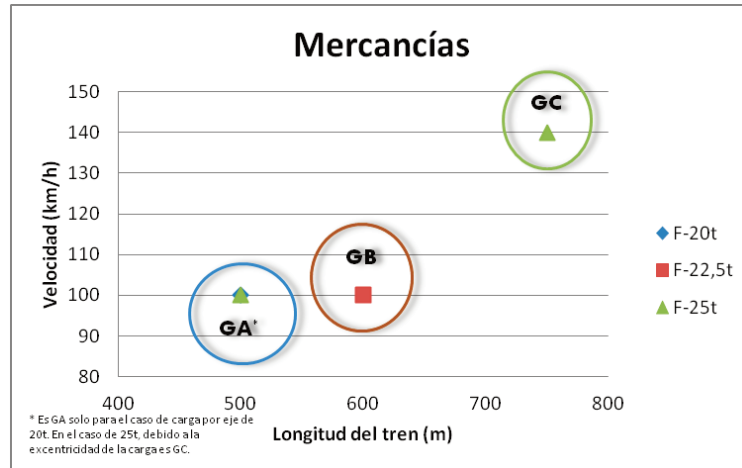


Fig.3. Gráfica que recoge los requerimientos del establecidos por la ETI de infraestructuras para mercancías en su apartado 4.2.1.. Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la figura 4, también se muestra el mismo tipo de gráfica para el caso de tráfico mixto, en el que también la evolución hacia el gálibo GC es evidente.

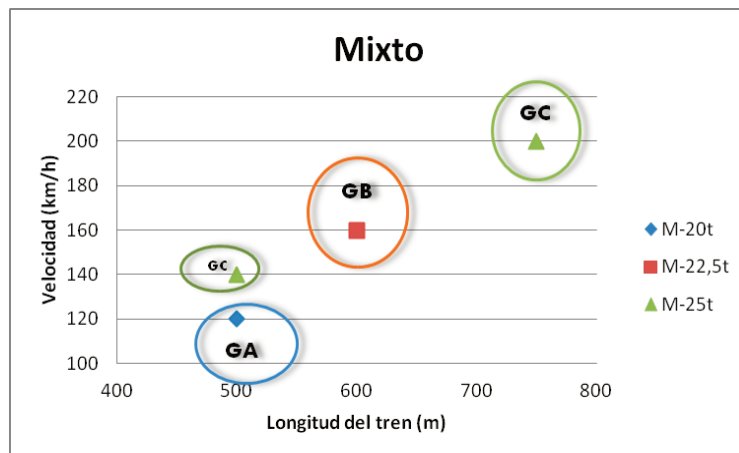


Fig. 4. Gráfica que recoge los requerimientos del establecidos por la ETI de infraestructuras para tráfico mixto en su apartado 4.2.1.. Fuente: Elaboración propia.

### 1.3. Contenido de la ETI del subsistema infraestructura

La ETI del subsistema infraestructura, relativa al sistema ferroviario transeuropeo convencional, define limitaciones en función de unos parámetros básicos que lo caracterizan definidos en el apartado 4.2.3.1. de la misma y de los cuales, teniendo en cuenta el tipo de obra de permeabilización, se ha centrado el estudio en los que se muestran en la tabla partiendo de la posible afección de estos parámetros en la infraestructura existente:



Tabla 1. Influencia de los parámetros básicos en las obras de permeabilización. Elaboración propia

		PASOS INFERIORES	PASOS SUPERIORES
<b>Trazado de las líneas</b>	Gálibo de implantación de obstáculos Distancia entre ejes de vías Radio mínimo de acuerdoa verticales	✓	✓
<b>Parámetros de vía</b>	Peralte Variación de peralte Insuficiencia de peralte	✓	✓
<b>Resistencia de la vía a las cargas aplicadas</b>	Cargas verticales Cargas logintudinales Cargas transversales	✓	
<b>Resistencia de las estructuras a las cargas del tráfico</b>	Resistencia de los puentes nuevos a las cargas del tráfico Carga vertical equivalente para las obras de tierra Resistencia de las estructuras nuevas sobre las vías o adyacentes a las mismas Resistencia a las cargas del tráfico de los puentes y obras de tierra existentes	✓	

#### 1.4. Fundamentos del estudio

Para la definición de la afección de las ETI en las obras de permeabilización, se ha basado el estudio que refleja el presente artículo, en dos proyectos: uno relativo a un paso inferior ejecutado mediante un marco de hormigón; y, el otro, un paso superior materializado mediante un puente de un solo vano formado por una capa de compresión que descansa sobre vigas prefabricadas apoyadas en dos estribos cerrados simétricos, cimentados sobre zapatas rectangulares. Estructuras que son, fundamentalmente, las empleadas en la mayoría de las obras de permeabilización existentes, cuyo análisis es representativo de los demás tipos.

El interés del paso superior se sustenta en un condicionante muy importante a la hora de garantizar la interoperabilidad del sistema: los gálibos. En este sentido, se debe comprobar si los gálibos actuales serán capaces de satisfacer las necesidades establecidas por las ETI.

Por otra parte, el estudio de los pasos inferiores también tiene gran relevancia para poder determinar si estas estructuras van a poder resistir el paso de los vehículos ferroviarios conforme a los criterios de carga por eje y velocidad establecidos por la Especificación.

Así, este artículo tiene como punto de partida dos proyectos de obras de permeabilización que han dado lugar a una línea de investigación para establecer si es necesaria o no la adaptación de las mismas conforme a las ETI y a las normas UNE-EN asociadas a las mismas.

## 2. Parámetros de vía

Con este nombre se engloban los apartados referentes a la geometría de la vía y que pueden afectar a las obras de permeabilización de pasos a nivel.

El parámetro de vía más importante a tener en cuenta es el ancho de vía nominal, que condiciona el resto de parámetros y aspectos relacionados con el ferrocarril debido a que es distinto en Europa y en España. El ancho existente en España es el ibérico, 1668 mm, y en Europa el ancho internacional o UIC, 1435 mm.

Esta diferencia de anchos hace que se necesiten plataformas y aparatos distintos, así como distintas alineaciones y peraltes.

Este hecho condiciona, por tanto, los pasos superiores e inferiores. Los pasos superiores por el gálibo necesario y los inferiores por la plataforma del ferrocarril necesaria.

En la ETI de Infraestructura sólo se plantea el ancho de vía internacional, dado que el objetivo es permitir la operación en todos los países. Tanto la conicidad, el perfil del carril, la inclinación y la rigidez sólo dependen del ancho de vía, siendo igual en cálculo y en valores.

El parámetro más importante es el peralte, que puede llegar a condicionar los gálibos y las obras de permeabilización por extensión. Este queda definido en la NRV 2001: “Parámetros geométricos nuevas líneas de ancho internacional” de mayo de 1989.

El peralte es diferente en función del tráfico de la vía, si es de pasajeros, mercancías o tráfico mixto.

Tabla 2. Comparación peraltes ETI-NRV. Elaboración propia.

Ancho Internacional	Pasajeros	Mixto-Mercancías
ETI	180	160 y en $R < 290m$ $D \leq (R-50)/1,5$
NRV	100-150	100

Se observa una clara compatibilidad de peraltes, dado que la NRV es más restrictiva que la ETI. En las obras de permeabilización, si se ha cumplido con la NRV se cumple con la ETI por lo que no haría falta ninguna adaptación adicional.

La insuficiencia de peralte es la medida del confort de los viajeros, por lo tanto la ETI propone que cada vehículo considerado tenga sus criterios de medida, en función de sus criterios de homologación, a no ser que el vehículo no esté equipado con sistemas de compensación, en cuyo caso, con velocidades menores o iguales a 200 km/h, los valores de insuficiencia de peralte serán:

**Appendix A.** De 130 mm para trenes de mercancías,

**Appendix B.** De 150 mm para trenes de pasajeros.

En la NRV se diferencia también valores de insuficiencia en función de la velocidad:

Tabla 3. Insuficiencia de peralte en la NRV Elaboración propia

Ancho internacional	160 km/h	200-250 km/h	300 km/h
Pasajeros	Normal 50 mm Máximo 80 mm		
Mixto	Normal 50 mm Máximo 100 mm		Normal 50 mm Máximo 70 mm

La NRV vuelve a ser más conservadora, con valores máximos de 80 mm para trenes de pasajeros (50 mm de valor normal para la insuficiencia de peralte), y de 70 mm para trenes de mercancías. Si se ha cumplido con dichos valores, se cumple con la ETI.

### 3. Trazado de las líneas

El trazado de las líneas incluye los apartados más importantes en cuanto a geometría de las líneas, ya que depende del ancho de vía que haya.

Los aspectos más importantes en este punto son el gálibo, la entrevía y los radios de las alineaciones curvas y de los acuerdos verticales.

### 3.1. Gálibo de implantación de obstáculos

El gálibo es el contorno de referencia determinado para el paso del ferrocarril. Hay muchos tipos de gálibos, estáticos, dinámicos, de obstáculos, etc, tanto para ancho ibérico como para ancho internacional.

En las obras de permeabilización ha de tenerse en cuenta el gálibo de implantación de obstáculos, definido en la “Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril”, de 25 de junio de 1975 (IAPF-75), utilizada hasta la entrada en vigor de la actual “Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril” de 24 de septiembre de 2007 (IAPF-07). Se utiliza la anterior, ya que es la que define los gálibos de implantación de obstáculos y además esta última ya incluye los parámetros de diseño marcados por la Unión Europea. Por esta razón, las obras de permeabilización a revisar corresponden a las construidas entre estas dos normativas.

El gálibo definido, entonces, en la IAPF-75 como gálibo de implantación de obstáculos es el siguiente:

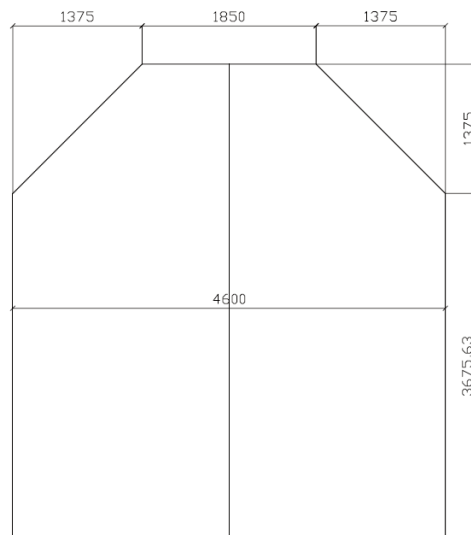


Figura 5. Gálibo de implantación de obstáculos en la IAPF-75. Elaboración propia.

Con este gálibo definido, hay que comprobar que el definido en la ETI y el exigido a España cabe en el de la IAPF-75. De esta manera, podrá confirmarse que, si en la construcción de la obra de permeabilización se cumplió dicha norma, se estará dentro de los parámetros de la ETI y no hará falta adaptación.

En la ETI de Infraestructura se remite a la norma UNE 15273 “Gálibos”, de mayo de 2011 que indica que el gálibo de implantación de obstáculos se calculará conforme al anexo C de dicha norma.

Hay tres tipos básicos de gálibos, como ya se ha definido en el apartado 1.2 del estudio:

En su origen, los gálibos GA, GB y GC se han definido para el transporte ferroviario de contenedores en Europa. Se recomienda liberar el gálibo GA en todas las redes interoperables, para los transportes de mercancías. Se recomienda prever itinerarios sobre la red europea, que correspondan al gálibo GB e incluso al GC.

Por tanto, con el fin de asemejarse al gálibo europeo y al mismo ancho, la ETI de Infraestructura propone que progresivamente se adapte el gálibo español a un tipo GC.

En España, ya se definió el gálibo para ancho internacional, en la NRV 2001 “Parámetros geométricos nuevas líneas de ancho internacional” de mayo de 1989:

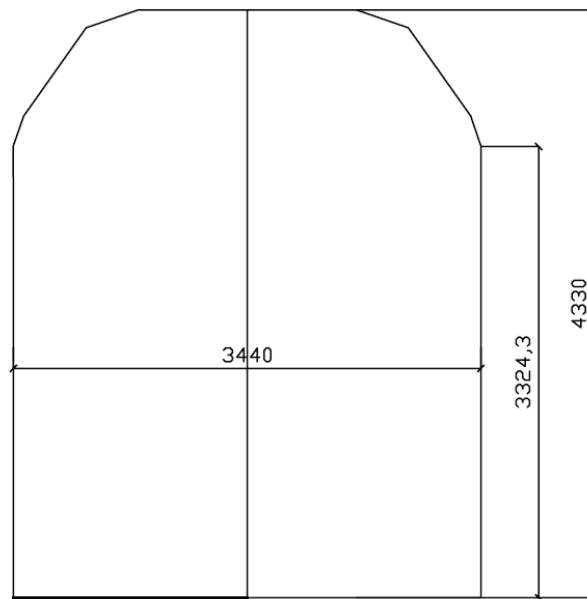


Figura 6. Gálibo de ancho internacional en la NRV. Elaboración propia.

Comparando estos gálibos con el exigido en la Unión Europea, se observa lo siguiente:

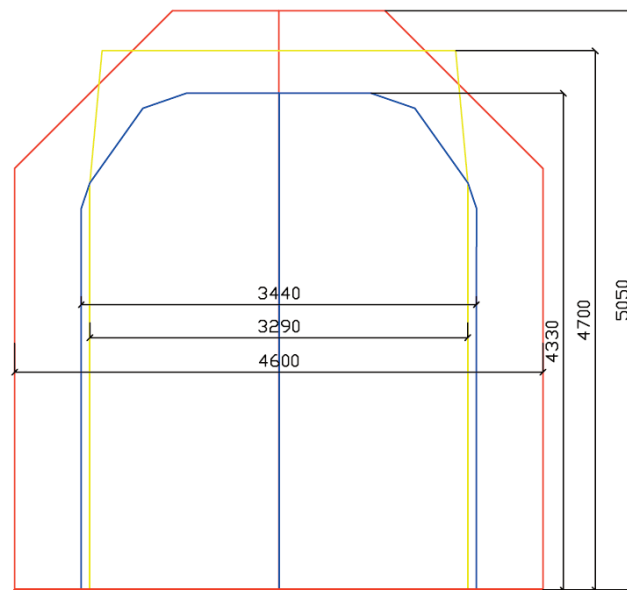


Figura 7. Comparación gálibos IAPF-75, ETI, NRV. Elaboración propia.

Es decir, el gálibo exigido por la Unión Europea en la ETI cabe en el gálibo de obstáculos propuestos en la IAPF-75, a excepción del triángulo superior. Por lo tanto, todos los pasos superiores que se hayan construido con la IAPF-75, dejando libre el triángulo superior exigido por la UNE, cumplen con la nueva norma, por lo que no es necesario adaptar dichas obras.

### 3.2. Entrevía

Otro caso distinto es la entrevía. Tanto en la IAPF-75 como en la NRV se ofrece un valor determinado: 3,70m y 4,30m, respectivamente. En cambio en la ETI se propone utilizar la UNE 15273, que dicta lo siguiente:

“Todos los márgenes, mencionados más arriba en el cálculo de la distancia límite entre los ejes de vías, están cubiertos por la distancia nominal entre los ejes de vías. La distancia nominal entre los ejes de vías presenta márgenes adicionales, que tienen que ser elegidos por el administrador de la infraestructura, sobre la base de los fenómenos que quiere cubrir:

1. un margen para aumentar el nivel de seguridad;
2. un margen adicional para el mantenimiento;
3. un margen para cubrir los fenómenos aerodinámicos;
4. un margen para facilitar la instalación de los aparatos de vía;
5. un margen para permitir la circulación de los transportes excepcionales;
6. una reserva para las modificaciones futuras de trazado o de gálibo;
7. márgenes para obtener una distancia entre ejes de vías invariable, que es fácilmente gestionable para los servicios de mantenimiento y de verificación, allí donde los márgenes reales son generosos;
8. márgenes adicionales para la seguridad de las personas salen del campo de aplicación de esta norma y se deben definir por la autoridad responsable.”

Por tanto, lo primero que cabría estudiar es la entrevía de las líneas actuales en los pasos superiores e inferiores, para que cumplan con lo dictado en la UNE. Tomando un valor tipo de entrevía de 4,30 m, los gálibos en vías dobles quedarían de la siguiente manera:

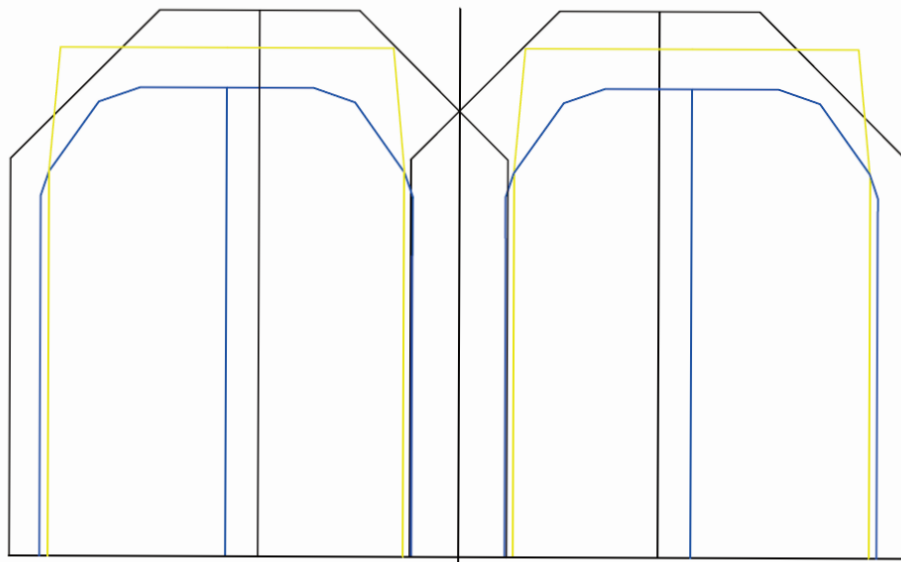


Figura 8. Comparación entrevía IAPF-75, ETI, NRV. Elaboración propia.

Si se cumple con la entrevía fijada, cabe esperar que los gálibos encajen excepto el triángulo superior que figura en la UNE. En estos casos, el coste implantación no sería, pues, excesivo.

Habría que estudiar el paso superior en su amplitud, para comprobar que cumplen, primero con la entrevía y después con los gálibos. Se estudian dos casos: puentes de uno y dos vanos, ya que el resto pueden considerarse repeticiones de estos. Si el puente tiene un vano y la vía es doble es igual que si el puente tiene dos vanos y se tienen cuatro vías o dos plataformas distintas.

En cualquier caso, habría que estudiar la anchura del paso según los siguientes valores:

Tabla 4. Comparación gálibo y entrevía NRV-ETI-IAPF-75

	Ancho de vía	Entrevía	Contorno gálibo
<b>NRV</b>	Internacional	4,30 m	3,44 m
<b>UNE</b>	Internacional	En función del gálibo	3,29 m
<b>IAPF-75</b>	Ibérico	3,70 m	4,60 m

En el caso de pasos inferiores, también habría que estudiar la entrevía, dado que puede suponer un aumento de la plataforma y del paso inferior. La ETI propone que la entrevía se calcule en función del gálibo, del tipo de carga y de la categoría de línea ETI.

Como ya se ha visto, esto no afecta a los pasos inferiores aunque se cambie de ancho ibérico a ancho internacional.

#### 4. Resistencia de la estructuras a las cargas

La especificación técnica de interoperabilidad (ETI) relativa al subsistema infraestructura, también hace referencia a la resistencia de las estructuras a las cargas del tráfico y a la resistencia de la vía a las cargas aplicadas como apartados fundamentales en la consideración de los parámetros básicos de diseño de vías interoperables.

Así pues, se hace necesario saber si las estructuras existentes, fruto de la aplicación de las normas vigentes en el periodo de tiempo en que fueron proyectadas, en primer lugar, y ejecutadas posteriormente, son suficientes para atender las necesidades establecidas por la ETI. Concretamente para este apartado, las únicas obras que se pueden ver afectadas por las cargas son los pasos inferiores y por tanto, las únicas que serán analizadas.

##### 4.1. Resistencia de las estructuras según instrucciones anteriores a ETI

Se establecen dos posibles casos en que pueden verse enmarcados tanto el proyecto como la construcción de los pasos inferiores: conforme la “Instrucción relativa a las acciones a considerar en el Proyecto de Puentes de Ferrocarril” de 1975, y según la actual “Instrucción de Acciones para Proyecto de Ferrocarriles” de 2007. Cabe señalar, que en España se han utilizado para el proyecto y ejecución de las obras ferroviarias, las Normas Renfe Vía, cuyo contenido, a pesar de no tener naturaleza legislativa, ha servido a lo largo de los años como patrón de seguimiento en el desarrollo de los mismos. En este caso, la NRV 1-2-3.0 relativa a “Puentes” de 1982, indica que se habría de seguir para el cálculo y dimensionamiento de los mismos la instrucción vigente por entonces, de 1975, mencionada unas líneas más arriba.

De este modo, las estructuras proyectadas para responder a la necesidad de permeabilización de las obras ferroviarias a partir del 25 de junio de 1975, hasta la entrada en vigor de la IAPF-2007, que sustituyó a la anterior, lo fueron bajo las pautas indicadas en la “Instrucción relativa a las acciones a considerar en el Proyecto de Puentes de Ferrocarril”. Para el cálculo de las sobrecargas móviles de uso, en ella se definen dos tipos de trenes de cargas en función de si el paso inferior va a soportar trenes de vía Renfe, y en consecuencia de ancho ibérico; u otro tipo de tren de cargas más sencillo para trenes de vía de ancho internacional.

En el primer caso, para cargas correspondientes a trenes de vía Renfe, se definen dos trenes de carga: A y B. La elección de uno u otro se basa en determinar cuál ofrece el resultado de sobrecarga más desfavorable para la estructura objeto de estudio.

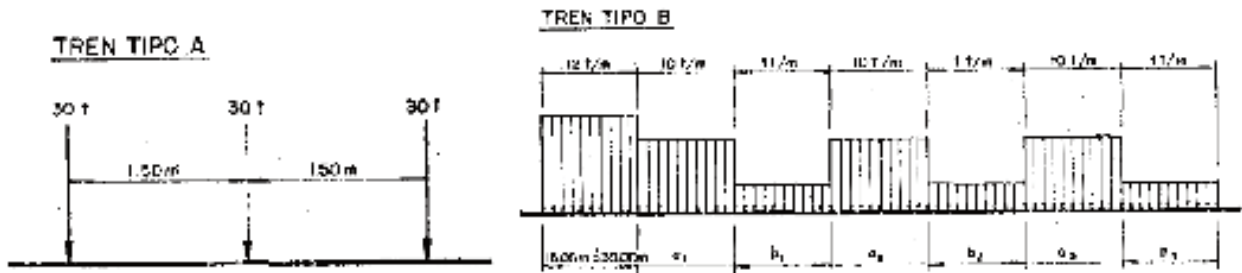


Fig. 9. (a) Tren tipo A - IPF-75; (b) Tren tipo B - IAP-75. Fuente: IPF-75

En el segundo caso, para aquellas cargas correspondientes a los ferrocarriles de vía de ancho internacional, se siguen las indicaciones de las Recomendaciones de la Union Internacional de Chemins de Fer, que estiman las sobrecargas convirtiendo las cargas reales en sobrecargas sencillas representadas mediante bloques rectangulares, respondiendo a un diagrama de esfuerzos uniforme y cuyos valores son los correspondientes a los que transmitiría cada una de las partes que conformen el tren: locomotora, vagones cargados y vagones vacíos.

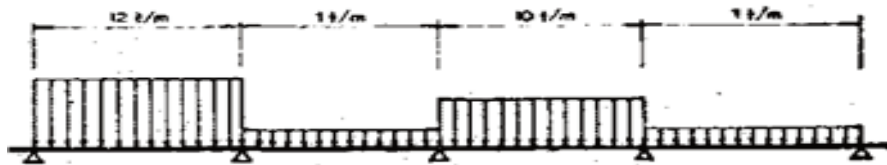


Fig. 10. Tren tipo a utilizar para vías de ancho UIC en el caso de proyectos de viaductos, pequeñas obras de fábrica y de acompañamiento. Fuente: IPF-75

Por el contrario, la instrucción de 2007 realiza un cálculo más pormenorizado modelizando el tren de cargas como el UIC71, mediante la aplicación de cuatro cargas puntuales de 250 kilonewton, distanciadas entre sí 1,6 metros y acompañadas, a 0,8 metros de distancia a ambos lados de las mismas, por cargas uniformemente repartidas de 80 kilonewton por metro en una longitud indefinida. Estando situadas en la posición más desfavorable para el elemento objeto de estudio. En la figura se puede apreciar el esquema de fuerzas correspondiente a dicho tren.

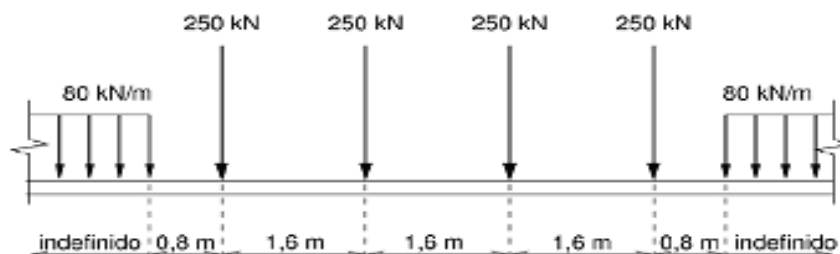


Fig. 11. Tren UIC71 para el cálculo de las sobrecargas móviles de uso. Fuente: IAPF-2007

Esta instrucción, una vez definido el tren de cargas, estima el cálculo de la sobrecarga, particularizada para el caso concreto que se esté analizando, mayorándola debido a la aplicación simultánea de un coeficiente de impacto, correspondiente al efecto amplificador del paso de los vehículos ferroviarios debido fundamentalmente a la acción de la carga por eje que transmiten los mismos; y a la consideración de un coeficiente de clasificación alfa, que en el caso de las vías de ancho UIC tiene un valor de 1,21. Se toma para este estudio el coeficiente

alfa correspondiente a vías de ancho UIC puesto que es la situación futura en la que estará España cuando se cumplan los requisitos establecidos por la ETI.

Se toma como valor definitorio en el cálculo de la sobrecarga de uso el resultado obtenido del cálculo del coeficiente de impacto. De este modo, teniendo en cuenta ambas instrucciones para el cálculo de la sobrecarga de uso, se observa que al aplicar la fórmula para el coeficiente de impacto según la IAPF-75, se obtiene un valor inferior que si se utiliza el método simplificado<sup>1</sup>, para velocidades inferiores a 220 km/h, multiplicado por el coeficiente de clasificación tal y como establece la IAPF-2007. Así pues, se puede concluir que el cálculo de las sobrecargas de uso está mayorado con respecto a las sobrecargas de uso calculadas según la anterior instrucción. La causa por la cual existe esta diferencia es la consideración de un tren de cargas diferente, el tren UIC71<sup>2</sup> y la aplicación del coeficiente de clasificación alfa, de valor 1,21, que según la propia instrucción indica, sirve para tener en cuenta la envolvente causada por el tren tipo normalizado según la instrucción UNE-EN 1991-2:2003, amplificando la envolvente del tren UIC71 y cubriendo de esta manera el tren tipo SW/0 definido en la citada norma UNE.

A continuación se pueden observar ambas fórmulas utilizadas en el cálculo de la sobrecarga de uso en cada una de las instrucciones citadas

$$\text{IAP-1975: } I = 65 \cdot \frac{\mu}{2 \mu + \mu^2} = 1,145 \quad (1)$$

Donde la única variable interviniente, el coeficiente  $\mu$ , depende de la velocidad de paso del vehículo ferroviario, la luz del elemento objeto de estudio y el periodo de vibración del dintel.

$$\text{IAPF-2007: } I = \frac{1,44}{\sqrt{1 + 0,2}} = 1,273 \quad (2)$$

Donde la única variable que interviene en la misma es la longitud equivalente, definida por la longitud media, medida en la línea media de la estructura, de los hastiales y el dintel, multiplicados por un factor 1,3.

En este caso se ha calculado para el paso inferior en el que se basa el estudio, para el cual se demuestra que el calcularlo de una u otra manera es claramente influyente, sobre todo teniendo en cuenta que estos resultados todavía no han sido afectados por el coeficiente de clasificación. En la siguiente tabla resumen se muestra esa clara afección así como la variación incremental resultante:

INSTRUCCIÓN	Coefficiente de Impacto	Coefficiente de clasificación ( $\alpha$ )	Coefficiente conjunto
IPF-1975	1,145	-	1,145
IAPF-2007	1,273	1,21	1,540
		<b>VARIACIÓN</b>	<b>+0,395</b>

Tabla 5. Coeficientes de aplicación para el cálculo de sobrecargas de uso

Una vez realizada la comparativa entre los resultados arrojados según las diferentes normativas, se puede concluir que los pasos realizados bajo la instrucción IAPF-2007 estarán dimensionados de forma que cumplan holgadamente debido a un incremento de la sobrecarga de uso, con respecto a los pasos calculados conforme a la IPF-1975, y por tanto serán capaces de resistir un tren de cargas mayor como consecuencia del incremento de velocidad o de las cargas por eje que transmitan los vehículos ferroviarios.

#### 4.2. Resistencia de las estructuras según ETI

Según la ETI, y siempre con el fin de atender al criterio fundamental de la interoperabilidad entre los sistemas ferroviarios de la Unión Europea, para el cálculo de la resistencia de las estructuras a las cargas del tráfico,

<sup>1</sup>El resultado obtenido por el método simplificado para el cálculo de coeficiente de impacto, es el más adecuado para el cálculo de estructuras tipo marcos de hormigón o pórticos como obras de permeabilización ferroviaria. Por esta razón se ha estudiado y comparado el valor obtenido por este método con el valor obtenido según las indicaciones de la anterior norma IPF-75.

<sup>2</sup>También llamado LM71 en el Eurocódigo



deben aplicarse los requisitos de la norma EN 1991-2:2003 Concretamente, en lo que se refiere al cálculo de las resistencia de los puentes nuevos a las cargas del tráfico, la ETI establece que se diseñarán las estructuras para que soporten las cargas establecidas en la norma UNE mencionada, aplicando el Modelo de Carga 71 y que además, para puentes continuos, se aplicará el modelo de Carga SW/0. Además, ambos se verán modificados por un factor alfa mínimo fijado según la categoría de la línea ETI y que se recoge en la siguiente tabla:

Tipos de línea o categorías de línea ETI	Factor alfa (a) mínimo
IV	1,1
V	1,0
VI	1,1
VII-P	0,83
VII-F, VII-M	0,91

Fig. 12. Cuadro 6 de la Decisión 2011/275/UE relativa al subsistema Infraestructura.

Dicho factor alfa se corresponde con el valor del coeficiente de clasificación ya mencionado en la IAPF-2007. Como se puede apreciar, el coeficiente utilizado en la instrucción es mayor a los indicados en la tabla, demostrando en este sentido, el cumplimiento de la Instrucción española para con el canon establecido por la Decisión.

Además, la ETI de infraestructura insta al cumplimiento de unos requisitos mínimos de capacidad de las estructuras para cada línea ETI según el anexo E de la Decisión 2011/275/UE. Dicho anexo establece los requisitos mínimos de capacidad de las estructuras según la categoría de línea ETI a la cual pertenece la plataforma ferroviaria en la que se disponen las obras de permeabilización objeto de estudio.

Este anexo define que el horizonte en cuanto a las estructuras es que las pertenecientes a las líneas principales nuevas de la red TEN, sean las que soporten unas mayores cargas por eje, 25 toneladas máximo, así como que permitan unas velocidades y longitudes de tren mayores, garantizadas mediante la implantación de un gálibo GC, del que ya se ha hablado previamente.

Todo lo arriba definido es aplicable para la sustitución de una estructura existente por otra nueva o para ejecución de obras nuevas.

En el caso de una estructura existente, y concretamente para el caso español, al haberse construido ya estructuras conforme a la IAPF-2007 que tiene en cuenta los requerimientos de la ETI, se plantean dos opciones:

- En el caso de que la estructura haya sido proyectada y en consecuencia, construida, según la IAPF-2007, no será necesario el refuerzo de la misma.
- En el caso de que la estructura haya sido proyectada y construida conforme a la IAPF-1975 o según prescripciones o sistemas alternativos, será necesario hacer una comprobación basada en la satisfacción de los requerimientos establecidos en el anexo E de la Decisión 2011/275/UE.

Las estructuras que se corresponden con la definición anterior, son aquellas que pertenecen a la categoría de línea ETI de líneas principales sujetas de ser acondicionadas de la red TEN. Para ellas, se requiere que, al menos, sean capaces de soportar una carga por eje de entre 20-22,5 toneladas<sup>3</sup> por eje. Estas cargas corresponden a la categoría C4 y D4 de la norma EN 15528:2008 respectivamente y ambas están recogidas en los modelos de carga de la norma EN1991-2 en el tren UIC71 y el SW0, ya mencionados anteriormente, ambos recogidos en la norma IAPF-2007. Con lo cual, la posible modificación o sustitución de las mismas deberá hacerse bajo esta instrucción ya que cumple con los criterios establecidos por la ETI. Esto es que, en el caso de que la estructura existente no cumpla con la capacidad portante mínima combinada con la velocidad permitida, exigida por los requisitos de la categoría de línea ETI a la cual pertenecen, no estará cumpliendo los requisitos de

interoperabilidad. Por esta razón, y con el fin de satisfacer el cumplimiento de ambos condicionantes, se tendrán que ejecutar aquellas obras oportunas para permitir la garantía de los mismos.

## 5. Conclusiones

Las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad pretenden asegurar que el tráfico ferroviario por toda Europa no tenga limitaciones, garantizando en todo momento el servicio a todos los países miembros de la Unión. Es muy importante, en este sentido, que los países recojan esas especificaciones, estudiándolas, para poder comprobar si la normativa en esa materia ya las recoge o por el contrario, es necesario renovar la normativa para asumir el contenido de las ETI.

Este artículo refleja el estudio de la Especificación Técnica de Interoperabilidad del subsistema de Infraestructura, primer subsistema que se debe adecuar si se quiere garantizar el cumplimiento de las Especificaciones en el periodo de tiempo previsto por la Unión Europea.

Las obras de permeabilización del ferrocarril son fundamentalmente las afectadas por esta ETI puesto que han sido dimensionadas conforme a normativas anteriores y casi siempre con una tendencia a ajustarse a los valores mínimos prefijados, siguiendo siempre la línea de la optimización tanto estructural como geométrica con el fin de conseguir un equilibrio entre la técnica y la economía. De este modo, los pasos superiores y los pasos inferiores ejecutados en España con anterioridad a la publicación de la ETI o incluso los que están siendo construidos ahora deben de considerar los siguientes aspectos:

En los pasos inferiores se debería estudiar, principalmente, la resistencia de las estructuras, procediendo al estudio de los pasos inferiores en el caso de que no hayan sido proyectados bajo la IAPF-2007 con el fin de poder definir la capacidad portante de la estructura en cuestión y comprobar si cumple los criterios establecidos por el anexo E de la ETI relativa al subsistema infraestructura. La posible afección en cuanto a los gálibos, solo supondría un incremento a nivel longitudinal del paso, por tanto y tras el análisis estructural pertinente.

Respecto a los pasos superiores, los parámetros que deberían revisarse son entrevías, gálibos y peraltes. En primer lugar habría que definir la entrevía necesaria, calculada según la UNE, conforme a los gálibos necesarios. Después, se medirían los gálibos actuales para que cumplieran con el anexo C de la norma UNE y por tanto con la ETI. En último lugar se comprobarían peraltes, definidos en la ETI en función del tipo de tráfico de la línea y de los vehículos utilizados en las mismas. En general, si los pasos están dimensionados conforme a las NRV, pueden cumplir con la ETI sin excesivos costes económicos ni repercusiones geométricas.

Estas conclusiones son aplicables, en líneas generales, a todas las obras de permeabilización. No obstante, para saber si una estructura es válida o no, debería hacerse un estudio pormenorizado de la misma, con el fin de establecer una afirmación o una negación en cuanto al cumplimiento de los requerimientos de las líneas ETI.

Por tanto, la Especificación Técnica de Interoperabilidad deja bastante margen a los países miembros de la Unión Europea a la hora de calcular los requerimientos necesarios que permitan la operación en ellos, así como el empleo de tecnologías o soluciones específicas en el subsistema de infraestructura.

## Referencias

[1] Directiva del Consejo 91/440/CEE, de 29 de julio de 1991, sobre el desarrollo de los ferrocarriles comunitarios.

[2] Decisión de la Comisión, de 30 de mayo de 2002, sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa al subsistema «Infraestructura» del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad mencionado en el apartado 1 del artículo 6 de la Directiva 96/48/CE

<sup>3</sup> Según tabla anexo E de Parámetros Característicos para las categorías de línea ETI.

[3] Directiva 2004/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, por la que se modifican la Directiva 96/48/CE del Consejo relativa a la interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad y la Directiva 2001/16/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo convencional.

[4] Decisión de la Comisión, de 28 de marzo de 2006, sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa al subsistema de control y mando y señalización del sistema ferroviario transeuropeo convencional.

[5] Decisión de la Comisión, de 28 de julio de 2006, sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa al subsistema “material rodante-vagones de mercancías” del sistema ferroviario transeuropeo convencional.

[6] Decisión de la Comisión, de 11 de agosto de 2006, sobre la especificación técnica de interoperabilidad referente al subsistema “Explotación y gestión del tráfico” del sistema ferroviario transeuropeo convencional.

[7] Directiva 2008/57/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008, sobre la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Comunidad.

[8] Decisión de la Comisión, de 19 de octubre de 2009, que modifica las Decisiones 2006/679/CE y 2006/860/CE en lo que se refiere a las especificaciones técnicas de interoperabilidad relativas a subsistemas de los sistemas ferroviarios transeuropeos convencional y de alta velocidad.

[9] Libro Verde, de 4 de febrero de 2009, RTE-T: Revisión de la política: Hacia una red transeuropea de transporte mejor integrada al servicio de la política común de transportes.

[10] Reglamento 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.

[11] Decisión de la Comisión, de 26 de abril de 2011, sobre la especificación técnica de interoperabilidad del subsistema de infraestructura del sistema ferroviario transeuropeo convencional.

[12] Libro Blanco, de 28 de marzo de 2011, hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible.

[13] Norma UNE-EN 15273 Aplicaciones ferroviarias: Gálibos, parte 3: Gálibo de implantación de obstáculos.

[14] NRV 2-0-0.0 Parámetros geométricos, 1989. Norma Renfe Vía.

[15] NRV 2-0-0.1 Parámetros geométricos nuevas líneas de ancho internacional, 1989. Norma Renfe Vía.

[16] NRV 3-8-1.0 Aparatos de vía combinados: Escapes, 1993. Norma Renfe Vía.

[17] NRV 3-8-2.0 Aparatos de vía combinados: Haces de vías, 1992. Norma Renfe Vía.

[18] NRV 7-3-2.0 Calificación de la vía: Ancho de vía, 1983. Norma Renfe Vía.

[19] NRV 7-3-2.5 Calificación de la vía: Inclinación del carril, 1992. Norma Renfe Vía.

[20] NRV 7-3-6.0 Calificación de la vía: Alineación, 1983. Norma Renfe Vía.

[21] Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril, de 25 de junio de 1975, Ministerio de Obras Públicas.

[22] Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril, de 24 de septiembre de 2007, Ministerio de Fomento.

[23] Declaración de red (2011), Adif.

[24] Barca González, R (2010). Estudio de estructuras ferroviarias sometidas a acciones dinámicas de tráfico. Master de Estructuras, Cimentaciones y Materiales, Universidad Politécnica de Madrid.

# Análisis del consumo de energía de los trenes de mercancías

## *Analysis of energy consumption of freight trains*

M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares\*

*Área de investigación, formación y colaboración científica, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid, 28012, España*

---

### Resumen

En esta ponencia se presenta una herramienta para la conversión de volúmenes de demanda de mercancías en unidades de oferta, ofreciendo otros resultados adicionales como los consumos de energía y los costes de explotación asociados. Se muestra un caso-ejemplo realizado con la herramienta, en el que para una carga anual de diferentes productos, se calcula el número de vagones y trenes necesarios y se estudia también la sensibilidad a diversos parámetros de la infraestructura y de la tracción del tren.

Palabras clave: trenes de mercancías, consumo, costes

### Abstract

*This paper presents a tool for converting volumes of demand for goods in units of supply, offering other outcomes such as energy consumption and associated operating costs. It shows a case example made with the tool, in which for an annual load of different products, it is estimated the number of wagons and trains necessary and also it considers the sensitivity to various parameters of the infrastructure and traction.*

*Keywords: freight trains, energy consumption, costs*

---

## 1. Herramienta PlanCargoRail

Para la planificación de la red ferroviaria, sus equipamientos y capacidades resulta necesario conocer cualitativa y cuantitativamente el tráfico que va a soportar. En el caso particular del transporte de mercancías, es preciso conocer las cantidades de productos a transportar y sus orígenes-destinos, datos que pueden ser determinados mediante análisis de mercado con técnicas convencionales. Se presenta la dificultad de que lo relevante para la producción, los costes y el dimensionamiento de la red no son los volúmenes y naturaleza de las mercancías, sino el número y tipo de los vagones y trenes en que se agrupan las mercancías y sus características. El fin de la herramienta desarrollada es convertir el volumen de la demanda de mercancías en unidades de oferta (vagones, trenes cargados y trenes vacíos) adecuadas para atenderla.

A partir de la carga anual a transportar (dadas las características de la línea, los vagones a emplear, la tracción y las restricciones de operación, todas ellas parametrizables), la herramienta PlanCargoRail permite obtener el número de vagones necesarios en el año y sus características. Teniendo en cuenta las limitaciones de carga (por rampa máxima, resistencia de los enganches, velocidad mínima en rampa, tamaño de lote y longitud máxima del tren) agrupa posteriormente los vagones en trenes. Adicionalmente, se puede obtener el consumo de energía de los trenes y los costes de explotación asociados.

\*Email autor de contacto: [pilarmartin@ffe.es](mailto:pilarmartin@ffe.es)

La herramienta permite modificar el valor de algunos parámetros como el peso por eje, aprovechamiento de los vagones, número máximo de vagones por lote, locomotoras que traccionan (número y tipo), longitud máxima del tren, etc. Por ello, se puede medir la sensibilidad del grado de utilización de la infraestructura, del coste y del consumo de energía a cada una de estas variables.

Los datos de costes empleados han sido tomados de (Rallo, 2008). Los consumos se obtienen mediante el simulador de consumos ALPI2810 en su versión 9, desarrollado por el Grupo de estudios e investigación de energía y emisiones en el ferrocarril de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, conforme a la Metodología de valoración del consumo energético de composiciones ferroviarias (FFE e IDAE, 2010).

Los algoritmos de cálculo están programados en “Visual Basic” para Excel y el interfaz de usuario está desarrollado en Excel, lo que facilita la entrada de datos al usuario familiarizado con dicha aplicación y la hace compatible con el resto de herramientas del paquete “Office”.

## 2. Proceso de cálculo

Una vez el usuario ha introducido los datos de la mercancía a transportar, condiciones de la infraestructura, características de la tracción y otros factores, se pueden iniciar los cálculos.

Lo primero es agrupar la carga en vagones, siendo este procedimiento diferente para el transporte intermodal de contenedores, para el de automóviles y para el resto de cargas. En el caso del transporte intermodal hay que realizar un paso previo, el de la conversión de la carga en contenedores.

Se puede escoger el tipo de vagón, ofreciéndose para cada subgrupo de mercancías un catálogo de vagones y entre ello, uno recomendado.

Una vez se conoce el número de vagones para ambos sentidos y la carga unitaria del vagón, se calculan las limitaciones de carga del tren, teniendo en cuenta las características de la línea, la tracción y las restricciones de la operación.

Conocido el número de vagones que puede llevar cada tren cargado y cada tren vacío se calcula el número de trenes así como sus características.

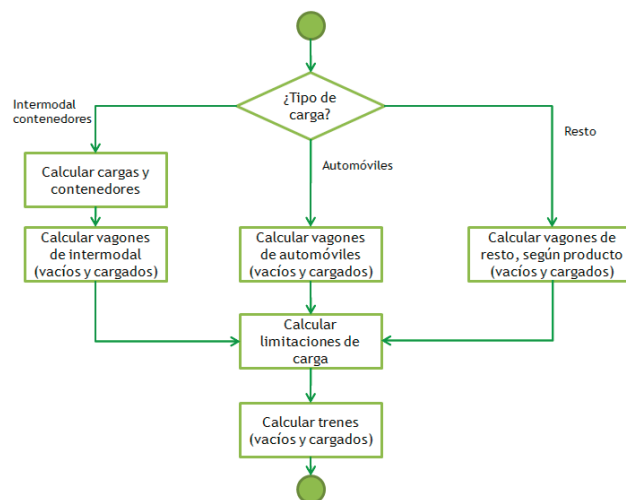


Fig. 1. Procedimiento de cálculo del número de trenes

### 2.1. Conversión de volúmenes de transporte en vagones

Para cada uno de los subgrupos de producto se tienen en cuenta los requerimientos del tipo de vagones que se necesitan para su transporte. Es decir, se considera la tara y carga máxima del vagón, el volumen que puede transportar y su longitud.

En muchos subgrupos de mercancías será preciso considerar además un “coeficiente de aprovechamiento” del vagón, ya que por ser piezas de tamaño discreto (no continuo) o por las peculiaridades de la forma del vagón, resulta imposible conseguir el 100% de la carga teórica.

En el caso de transporte de automóviles es preciso determinar cuántos vehículos caben por vagón, para lo cual se tienen en cuenta dos limitaciones, la longitud y la masa de los vehículos, siendo siempre la más restrictiva (en este tipo de transporte) la longitud.

Se asume la hipótesis, contrastada por la experiencia y la realidad actual, de que (en el tráfico de vagón completo) cada vagón cargado en una determinada relación de tráfico comporta el recorrido de ese mismo vagón vacío en la dirección opuesta. Es decir, sintéticamente, cada vagón cargado origina un vagón vacío. Ello no ocurre así en el tráfico intermodal, para el que se suponen los mismos movimientos de vagones (plataformas) en ambos sentidos.

### Transporte intermodal de contenedores

En el caso de transporte intermodal de contenedores puede definirse la carga a transportar de cuatro formas distintas:

- Toneladas del sentido más cargado.
- Toneladas y contenedores vacíos del sentido más cargado.
- Toneladas de ambos sentidos
- Toneladas y contenedores vacíos de ambos sentidos.

A partir de los datos definidos por el usuario hay que llegar a determinar las toneladas transportadas en ambos sentidos y el número de contenedores cargados y de contenedores vacíos para cada uno de los sentidos.

El número de contenedores se calcula teniendo en cuenta el coeficiente de densidad y la carga máxima de los mismos.

### *2.2. Cálculo de las limitaciones de carga del tren*

Una vez se han calculado los vagones necesarios para transportar la carga, hay que agruparlos para la formación de trenes, atendiendo a ciertas limitaciones.

Las limitaciones de carga se calculan, tanto para el tren en el sentido más cargado como para el sentido menos cargado, conforme se detalla a continuación.

Las limitaciones que se tienen en cuenta son: la rampa máxima, el esfuerzo admisible en los enganches, la velocidad mínima exigida en rampa, la longitud máxima del tren y el número máximo de vagones por lote.

### Carga remolcada limitada por la rampa máxima

Una vez se conoce la rampa característica máxima de la línea, las cargas máximas se determinan consultando una tabla publicada por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias en la que figura la carga máxima de las distintas locomotoras en función de la rampa característica.

Esta tabla tiene en cuenta la carga máxima arrancable en régimen máximo y por adherencia; la carga máxima remolcable en régimen continuo, unihorario y limitada por adherencia en la marcha (Estrada, 2010).

### Carga remolcada limitada por el esfuerzo admisible por los enganches

Cada vez es más frecuente el acoplamiento de locomotoras para remolcar trenes de mayor masa con el mismo consumo de capacidad de infraestructura (de surcos) y con mayor productividad del personal de conducción. Dos locomotoras acopladas en cabeza de tren posibilitan el remolque de casi el doble de carga. En estas

circunstancias tan solo la capacidad máxima del esfuerzo en el gancho limita el número de locomotoras que pueden ir en cabeza, ya que podría llegarse a la rotura del gancho del primer vagón por superar el esfuerzo de tracción al que sería sometido.

#### Carga remolcada limitada por la velocidad mínima en rampa

En los trenes de mercancías es necesario tener en cuenta la velocidad mínima en función de la tracción y de la carga. La influencia de la carga en el tiempo de recorrido es notable, especialmente en el caso de la tracción diésel. El incremento del tiempo de recorrido incide directamente en el uso de la capacidad de línea, especialmente en los casos de vía única. Por ello el administrador de infraestructuras puede establecer una velocidad mínima de circulación en rampa.

#### Carga remolcada limitada por la longitud máxima del tren

En la mayor parte de las líneas ferroviarias existe una limitación de longitud derivada de la capacidad de estacionamiento de las vía de apartado en las que los trenes de mercancías deben situarse para facilitar el cruce y adelantamiento con otros trenes que circulan por la línea o entre ellos mismos. Esta limitación también existe en líneas dotadas de vía doble por los adelantamientos, establecimiento de vías únicas temporales por trabajos o estacionamiento de trenes averiados.

Normalmente es el gestor de la infraestructura el que establece la limitación de la longitud, indicándola en la Declaración sobre la red.

#### Carga remolcada limitada por el número máximo de vagones por lote

El cliente puede establecer el número máximo de vagones a transportar en cada tren, por ejemplo por las características de los apartaderos de carga o descarga, y dicha limitación se debe considerar a la hora de efectuar el transporte.

### *2.3. Cálculo del número de trenes*

Conocido el número de vagones a transportar y los vagones por tren, según las limitaciones anteriormente calculadas, se determina el número de trenes para el sentido más cargado.

A partir del número de trenes cargados se determina el número de trenes vacíos teniendo en cuenta el “factor logístico” (trenes vacíos/trenes cargado) definido por el usuario, que indica cuántos trenes vacíos hay por cada tren cargado.

## **3. Caso de ejemplo de utilización de la herramienta**

A continuación se desarrolla un caso de ejemplo en el que se muestra la agrupación de la carga anual en vagones y trenes cargados y vacíos considerando las limitaciones de carga y variándose algunos parámetros del tren y la infraestructura. Para los mismos casos se realiza un análisis de sensibilidad del consumo de energía y costes.

### *3.1. Parámetros de la simulación*

A continuación se detallan los productos, líneas y material motor y remolcado que se han empleado para realizar las simulaciones.

#### Productos

Se han empleado dos productos de mercancías, los automóviles como representativos de mercancías “ligeras”, de baja densidad de carga, y siderúrgicos planos, como muestra de productos “densos”.



En el caso de los automóviles se ha supuesto una carga anual de 5.000.000 vehículos y para los siderúrgicos de 5.000.000 toneladas.

### Líneas

Para realizar las simulaciones se han empleado dos líneas, una representativa de los trazados montañosos, León-Gijón, y otra de perfil más llano, Valladolid-León.

La línea León-Gijón tiene una longitud de 171,6 km y la rampa característica máxima es en el sentido León-Gijón de 23 milésimas y en el opuesto de 22 milésimas.

La línea Valladolid-León tiene una longitud de 171,2 km y la rampa características máxima es en el sentido Valladolid-León de 12 milésimas y en el contrario 10 milésimas.

Se ha supuesto que los trenes cargados circulan de Gijón hasta León y desde Valladolid a León y los vacíos lo hacen en el sentido opuesto.

### Material

Para traccionar los trenes simulados se han empleado la locomotora diésel serie 333.300 y la eléctrica serie 250, ambas utilizadas habitualmente en el transporte de mercancías en España.

La locomotora eléctrica 250 no dispone de freno regenerativo, pero como se ha querido tener en cuenta el efecto de esta tecnología, se han realizado simulaciones suponiendo su existencia.

En la tabla se muestran las características principales de las máquinas empleadas y las cargas que pueden remolcar en rampa, conforme a (Adif, 2010).

Tabla 1. Características de las locomotoras empleadas para la simulación

		<b>333.300 Diésel</b>	<b>250 Eléctrica</b>
Fabricante		Vossloh	MTM-CAF
Rodaje		Co'Co'	C'C'
Tara	<i>t</i>	120	124
Longitud	<i>m</i>	22,330	20,000
Potencia	<i>kw</i>	2.237	4.600
Carga remolcable en rampa de 0 mm/m	<i>t</i>	2.500	2.500
Carga remolcable en rampa de 5 mm/m	<i>t</i>	2.500	2.500
Carga remolcable en rampa de 10 mm/m	<i>t</i>	1.950	2.090
Carga remolcable en rampa de 15 mm/m	<i>t</i>	1.410	1.530
Carga remolcable en rampa de 20 mm/m	<i>t</i>	1.100	1.190
Carga remolcable en rampa de 25 mm/m	<i>t</i>	880	970

Para el transporte de automóviles se han empleado las plataformas de dos pisos MA 5 y para el transporte de siderúrgicos planos los vagones portabobinas con toldo deslizante JJ92.

Tabla 2. Características de los vagones empleados para la simulación

		MA5 Porta automóviles 2 pisos	JJ92 Portabobinas toldos deslizantes
Ejes		4	4
Carga máxima (t)	t	22	65
Tara media(t)	t	28	25
Peso por eje (t)	t	12	23
Longitud entre topes (m)	m	27	12
Longitud interior caja (m)	m	52	11
Altura máxima interior (m)	m	4	3
Anchura máxima interior (m)	m	3	3
Velocidad máxima (km/h)	km/h	100	120

### Unidades

Las emisiones se han medido en kilogramos de dióxido de carbono por tonelada neta kilómetro y los costes de explotación en céntimos de euro por tonelada neta kilómetro. En todos los casos se tienen en cuenta los recorridos en vacío, ya que como hipótesis se ha establecido que todo tren cargado genera un tren vacío con un número de vagones inferior o igual que viene determinado por el coeficiente de vacíos. A este coeficiente se le ha dado el valor de 0,8 en transporte de automóviles y 1 para los siderúrgicos planos.

Los costes de explotación contemplan los costes de alquiler o amortización y mantenimiento de las locomotoras y vagones; canon por el uso de la infraestructura; costes de operación en los que se incluyen los costes de personal y de energía.

### 3.2. Determinación de la capacidad de la infraestructura consumida

A continuación se muestran y analizan los resultados obtenidos de agrupación de carga en vagones y trenes, variando algunos parámetros del tren y de la infraestructura.

#### Simulación del transporte de automóviles

La limitación de carga en el caso de transporte de automóviles no es la masa sino la longitud de los mismos. Las limitaciones por “carga en rampa máxima”, “velocidad mínima en rampa” y “esfuerzo de los enganches” son siempre menos restrictivas que la de longitud máxima del tren. Por ello, en este caso tiene sentido analizar la sensibilidad al tipo de tracción y a la longitud del tren y no a la carga por eje.

#### *Tipo de tracción en trenes ligeros*

Se realizan los cálculos para ambas líneas, con locomotora eléctrica y diésel, como hipótesis de simulación se ha supuesto que la carga por eje es 22,5 toneladas, la longitud máxima del tren 450 metros y la fuerza de los enganches 360 kN.

Tabla 3. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la tracción

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón
Locomotora	Eléctrica 250	Diésel 333.300	Eléctrica 250	Diésel 333.300
Vagones cargados/año	425.713	425.713	425.713	425.713
Vagones vacíos/año	340.570	340.570	340.570	340.570
Trenes cargados/año	28.381	28.381	28.381	28.381
Trenes vacíos/año	28.381	28.381	28.381	28.381
Vagones tren cargado	15	15	15	15
Vagones tren vacío	12	12	12	12
Limitación tren cargado	Long max	Long max	Long max	Long max
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/ masa tren cargado	0,2462	0,2475	0,2462	0,2475
Carga neta/(masa tren cargado + masa tren vacío)	0,1503	0,1513	0,1503	0,1513

Como puede observarse, en caso de trenes ligeros el número de vagones admisibles por tren es el mismo en ambas líneas y con los dos tipos de tracción, pues la condición restrictiva es la longitud máxima del tren.

#### *Longitud máxima del tren en trenes ligeros*

Se muestran a continuación los cálculos para longitudes máximas de tren de 450, 600 y 750 m, en ambas líneas con la locomotora eléctrica 250, considerándose como hipótesis de simulación que la carga por eje es de 22,5 t y la fuerza de los enganches 360 kN.

Tabla 4. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la longitud máxima admisible del tren

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón	León-Gijón
Longitud máxima	450	600	750	450	600	750
Vagones cargados/año	425.713	425.713	425.713	425.713	425.713	425.713
Vagones vacíos/año	340.570	340.570	340.570	340.570	340.570	340.570
Trenes cargados/año	28.381	20.272	15.767	28.381	20.272	16.374
Trenes vacíos/año	28.381	20.272	15.767	28.381	20.272	16.374
Vagones tren cargado	15	21	27	15	21	26
Vagones tren vacío	12	16,8	21,6	12	16,8	20,8
Limitación tren cargado	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/ masa tren cargado	0,2462	0,2590	0,2667	0,2462	0,2590	0,2656
Carga neta/ (masa tren cargado+ masa tren vacío)	0,1503	0,1600	0,1659	0,1503	0,1600	0,1651

Puede observarse que en ambas líneas el aumento de la longitud de máxima admisible del tren supone incrementar el número de vagones que puede llevar el tren y por ello reducir el número de trenes y el uso de la capacidad de la infraestructura.

#### Simulación del transporte de siderúrgicos planos

En el transporte de mercancías “densas” las limitaciones de carga del tren son la carga máxima en rampa, la fuerza de los enganches y la carga admisible para mantener la velocidad mínima en rampa establecida. Sin

embargo, la limitación de longitud del tren es siempre la menos restrictiva. Por ello a continuación se muestran los resultados de vagones y trenes con distintos tipos de tracción y carga por eje.

*Tipo de tracción en trenes “densos”*

Se han simulado en ambas líneas trenes remolcados por la locomotora eléctrica y la diésel, como hipótesis se ha supuesto que la carga por eje es de 22,5 toneladas, la fuerza de los enganches 360 kN y la longitud máxima del tren 600 metros.

*Tabla 5. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la tracción*

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón
Locomotora	Eléctrica 250	Diésel 333.300	Eléctrica 250	Diésel 333.300
Vagones cargados/año	81.347	81.347	81.347	81.347
Vagones vacíos/año	81.347	81.347	81.347	81.347
Trenes cargados/año	3.389	3.698	6.779	7.395
Trenes vacíos/año	3.389	3.698	6.779	7.395
Vagones tren cargado	24	22	12	11
Vagones tren vacío	24	22	12	11
Limitación tren cargado	Rampa max	Rampa max	Rampa max	Rampa max
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/masa tren cargado	0,6686	0,6665	0,6330	0,6293
Carga neta/(masa tren cargado+ masa tren vacío)	0,5022	0,4998	0,4631	0,4591

Puede observarse que en ambas líneas los trenes remolcados por la máquina eléctrica pueden remolcar mayor número de vagones, esto es debido a que el factor que limita la carga del tren es la carga remolcable en rampa máxima y la máquina eléctrica puede remolcar mayor carga que la diésel. Si se comparan los resultados de ambas líneas se aprecia que los trenes de León-Gijón llevan la mitad de vagones los de Valladolid-León pues el perfil de esta última línea es mucho más favorable.

El mismo análisis se muestra a continuación en el caso de que los trenes sean remolcados por dos locomotoras.

*Tabla 6. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos remolcados por doble tracción*

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón
Locomotora	2xEléctrica 250	2xDiésel 333.300	2xEléctrica 250	2xDiésel 333.300
Vagones cargados/año	81.347	81.347	81.347	81.347
Vagones vacíos/año	81.347	81.347	81.347	81.347
Trenes cargados/año	2.805	2.805	6.257	6.257
Trenes vacío/año	2.805	2.805	6.257	6.257
Vagones tren cargado	29	29	13	13
Vagones tren vacío	29	29	13	13
Limitación tren cargado	Enganches	Enganches	Enganches	Enganches
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/masa tren cargado	0.6449	0,6467	0,5807	0,5841
Carga neta/(masa tren cargado+masa tren vacío)	0.4759	0,4779	0,4092	0,4125

Estos trenes no llevan el doble de carga que los remolcados por una única máquina debido a que están condicionados por la fuerza de los enganches.

#### *Carga por eje en trenes “densos”*

Para estudiar la influencia de la carga por eje en trenes densos se han considerado cargas por eje de 20, 22,5 y 25 t y se ha empleado la máquina eléctrica, suponiéndose que la fuerza de los enganches es de 360 kN y la longitud máxima de los trenes es 600 m

*Tabla 7. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje*

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	Vallad.-León	León-Gijón	León-Gijón	León-Gijón
Carga por eje	20	22,5	25	20	22,5	25
Vagones cargados/año	96.219	81.347	70.457	96.219	81.347	74.129
Vagones vacíos/año	96.219	81.347	70.457	96.219	81.347	74.129
Trenes cargados/año	3.564	3.389	3.355	7.401	6.779	6.739
Trenes vacíos/año	3.564	3.389	3.355	7.401	6.779	6.739
Vagones tren cargado	27	24	21	13	12	11
Vagones tren vacío	27	24	21	13	12	11
Limitación tren cargado	Rampa max	Rampa max	Rampa max	Rampa max	Ramapa max	Ramapa max
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max	Long max
Carga neta/masa tren cargado	0,6348	0,6686	0,6946	0,5987	0,6330	0,6484
Carga neta/(masa tren cargado+masa tren vacío)	0,4650	0,5022	0,5321	0,4272	0,4631	0,4797

Puede observarse que conforme se incrementa la carga por eje van siendo necesarios menos trenes al año y con un menor número de vagones y de trenes, pues cada vagón puede transportar mayor carga.

El mismo análisis se realiza con doble tracción.

*Tabla 8.. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje en doble*

Línea	Vallad.-León	Vallad.-León	Vallad.-León
Carga por eje	20	22,5	25
Vagones cargados/año	96.219	81.347	74.129
Vagones vacíos/año	96.219	81.347	74.129
Trenes cargados/año	3.007	2.805	2.746
Trenes vacíos/año	3.007	2.805	2.746
Vagones tren cargado	32	29	27
Vagones tren vacío	32	29	27
Limitación tren cargado	Enganches	Enganches	Enganches
Limitación tren vacío	Long max	Long max	Long max
Carga neta/masa tren cargado	0,6112	0,6449	0,6617
Carga neta/(masa tren cargado+masa tren vacío)	0,4401	0,4759	0,4944

Vuelve a apreciarse que la doble tracción no supone duplicar la carga transportada por cada tren pues esta se encuentra limitada por la fuerza de los enganches.

### *3.3. Análisis de sensibilidad del coste y emisiones tráfico de mercancías a parámetros de la infraestructura y el tren*

Para mostrar la funcionalidad de la herramienta se ha desarrollado con ella un estudio complementario sobre la sensibilidad de los costes económicos y las emisiones de dióxido de carbono a la variación de parámetros

característicos de la infraestructura, como la longitud admisible de los trenes y la carga por eje; y a la variación de la tracción (diésel o eléctrica, simple o doble).

### Simulación del transporte de automóviles

Se analiza a continuación la sensibilidad de los costes de explotación y las emisiones al tipo de tracción y a la longitud del tren.

#### *Tipo de tracción en trenes ligeros*

Como se puede observar en la siguiente figura, en el caso de la línea León-Gijón las emisiones de CO<sub>2</sub> de la máquina eléctrica con freno regenerativo son muy inferiores a las de la misma máquina sin freno regenerativo. Esta diferencia es debida a las fuertes pendientes que presenta esta línea, en las que es necesario frenar para no superar la velocidad máxima admisible y por ello se puede regenerar más energía. Sin embargo, si se realiza la misma comparación en la línea Valladolid-León las emisiones son bastante similares.

En ambas líneas las emisiones del tren remolcado por la máquina diésel aproximadamente tres veces superiores a las de la tracción eléctrica, como ya señalaba (García Álvarez, 2009). En la línea León-Gijón las emisiones del tren eléctrico con freno regenerativo son 0,0379 kgCO<sub>2</sub>/teta.km frente a los 0,0937 kgCO<sub>2</sub>/teta.km del tren diésel.

En cuanto a los costes de explotación, los del tren remolcado por la máquina eléctrica con freno regenerativo son algo menores que los del remolcado por la máquina sin freno regenerativo (en la línea Valladolid-León 9,906 c€/teta.km y 9,962 c€/teta.km respectivamente) debido al menor consumo neto de energía. Los costes del tren diésel son siempre superiores debido al mayor coste de mantenimiento de estas máquinas y de la energía, y a que la máquina diésel puede remolcar menos toneladas por lo que son necesarios más trenes para realizar el mismo transporte.

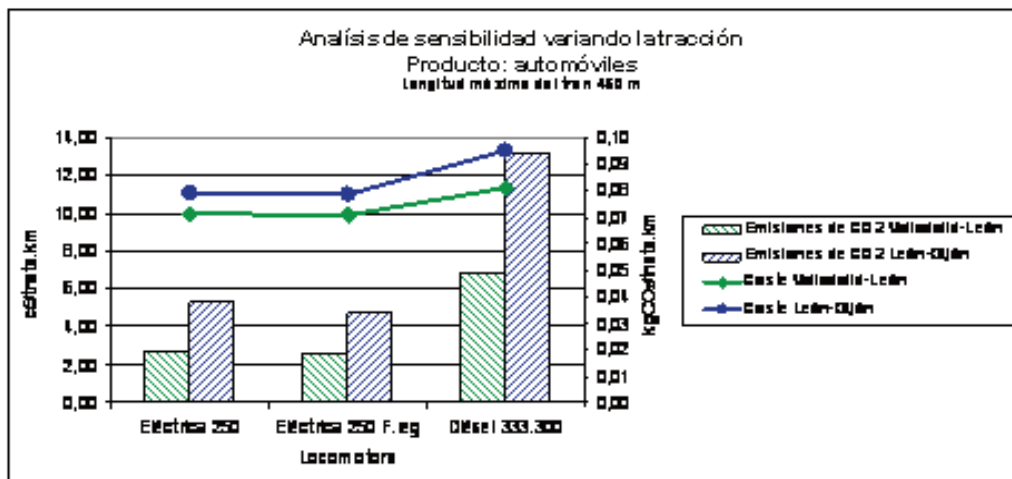


Fig. 2. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la tracción

#### *Longitud máxima del tren en trenes ligeros*

Los resultados de la simulación muestran que en ambas líneas al incrementarse la longitud del tren se produce una pequeña disminución de las emisiones. Sin embargo, el efecto de este factor se aprecia en los costes que decrecen considerablemente al incrementarse la longitud. Ello es debido a que los costes de las locomotoras, personal y canon por el uso de la infraestructura se mantienen y se dividen entre un mayor número de toneladas netas transportadas. Un incremento de la longitud del tren del 33% supone una reducción de costes del 19% en la línea Valladolid-León y del 17% en la línea León-Gijón.

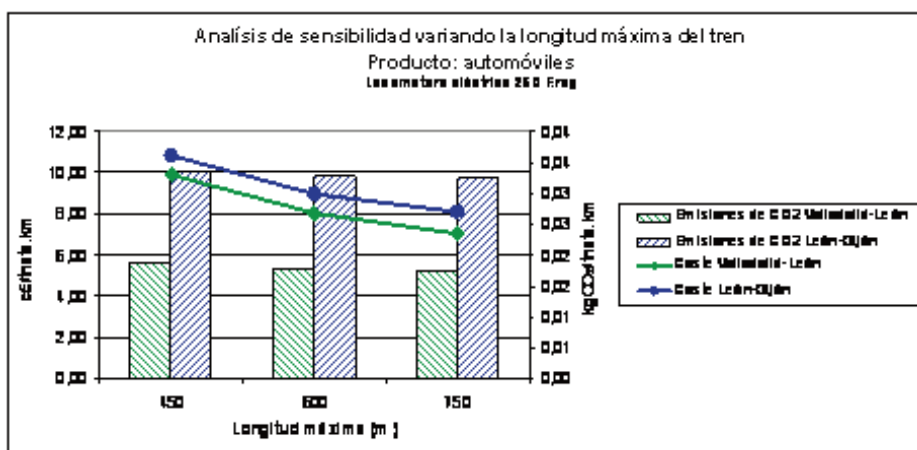


Fig. 3. Resultados de la simulación del tráfico de automóviles variando la longitud máxima admisible del tren

### Simulación del transporte de siderúrgicos planos

A continuación se estudia la sensibilidad de los costes de explotación y las emisiones al tipo de tracción y la carga por eje.

#### Tipo de tracción en trenes densos

Las emisiones de CO2 en la línea montañosa (León-Gijón) son siempre superiores a las de la línea llana (Valladolid-León), debido al trazado más desfavorable que presenta la primera y a la necesidad de frenar en las pendientes. Por la misma razón que se expuso en el caso del transporte de automóviles, las emisiones del tren eléctrico con freno regenerativo son inferiores a las del tren eléctrico sin freno regenerativo. Las emisiones del tren diésel son muy superiores a las del eléctrico; por ejemplo en la línea León-Gijón 0,0098 kgCO2/teta.km para el tren remolcado por la máquina eléctrica con freno regenerativo y 0,0271 kgCO2/teta.km para el tren traccionado por la máquina diésel.

Los costes de explotación del tren eléctrico son siempre inferiores a los del tren diésel (2,659, 2,598 y 3,455 c€/teta.km respectivamente). Si se comparan los costes en ambas líneas se puede apreciar que son muy superiores en la línea León-Gijón (en el caso de tracción eléctrica sin freno regenerativo 1,468 c€/teta.km frente a 2,659 c€/teta.km), ello es debido a que las limitaciones de carga por rampa máxima, que son las que este caso determinar el tamaño del tren, son más restrictivas en esta línea y por lo tanto se requiere un mayor número de trenes para realizar el transporte, lo que implica mayores costes de explotación por tren.km y consecuentemente por tonelada neta.km.

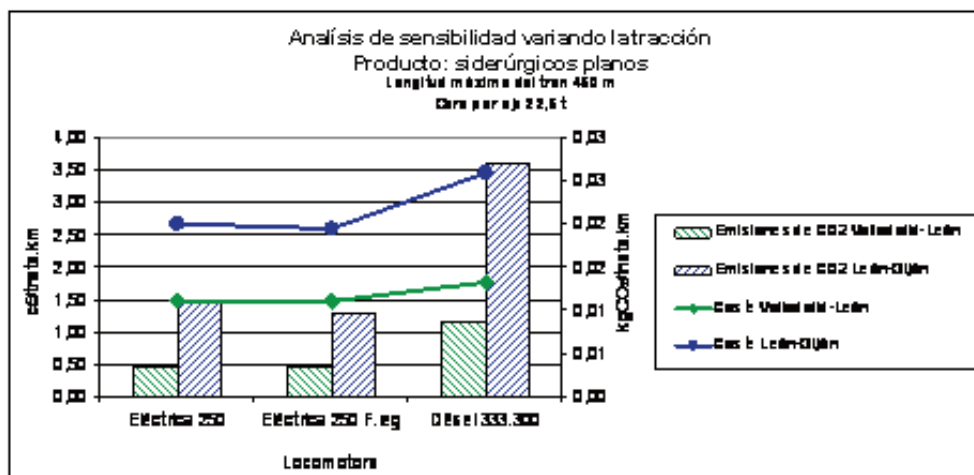


Fig. 4. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la tracción

A continuación se ha estudiado el efecto que tiene el empleo de doble tracción, que permite remolcar mayores cargas. Los costes aumentan en mayor proporción que la carga que se puede transportar que no llega al doble pues aparece una limitación por el esfuerzo que admiten los enganches.

Las emisiones en la línea León Gijón se incrementan entre un 5 y un 10% y los costes un 40%.

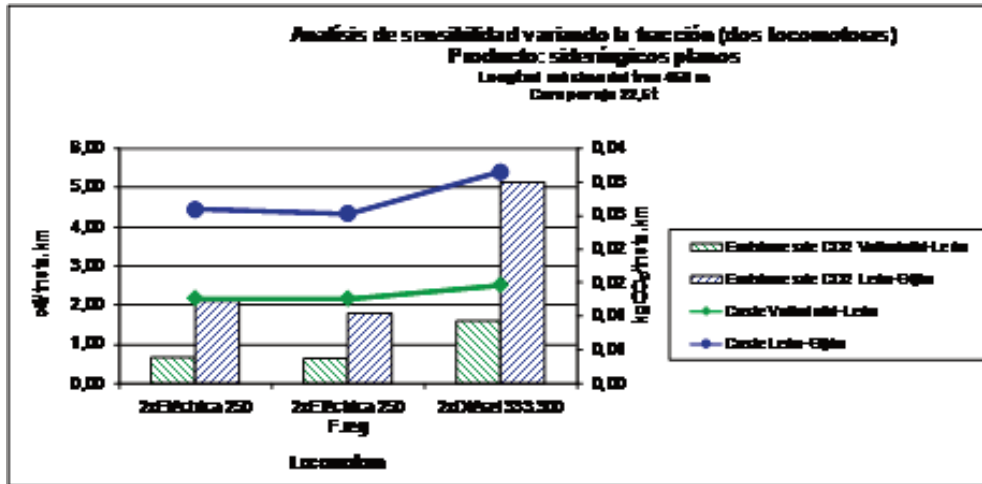


Fig. 5. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos remolcados por doble tracción

*Carga por eje en trenes densos*

Como se observa en la gráfica el incremento de la carga por eje admisible supone en este producto una reducción de los costes de explotación y de las emisiones, aunque esta última no es muy significativa. Un incremento del 11% de la carga por eje se traduce en una reducción de las emisiones del 7% y un 10% de los costes.

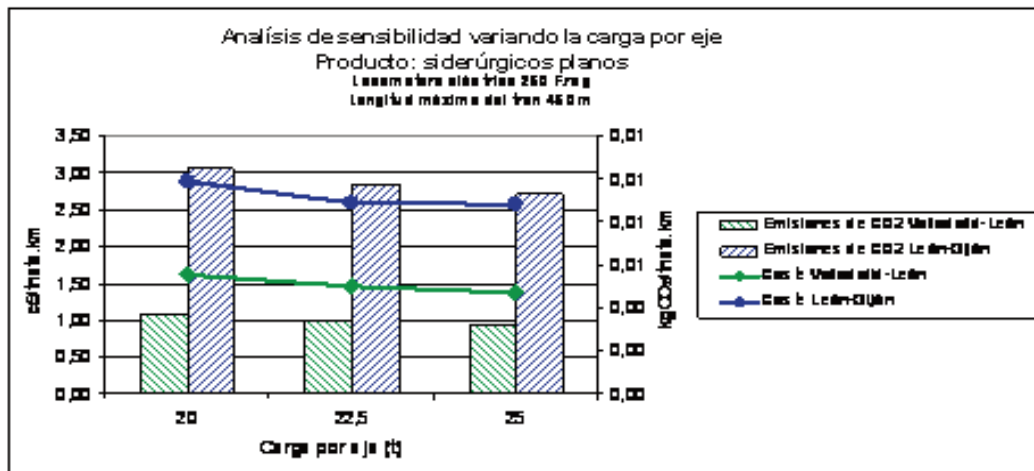


Fig. 6. Resultados de la simulación del tráfico de siderúrgicos planos variando la carga por eje

**3.4. Conclusiones**

1. La herramienta de simulación presentada permite a partir de la carga anual a transportar (dadas las características de la línea, los vagones a emplear, la tracción y las restricciones de operación, todas ellas parametrizables), obtener el número de vagones necesarios en el año y sus características. Teniendo en cuenta las limitaciones de carga (por rampa máxima, resistencia de los enganches, velocidad mínima en rampa, tamaño de lote y longitud máxima del tren) agrupa posteriormente los vagones en trenes.



2. Adicionalmente, PlanCargoRail obtiene el consumo de energía de los trenes y los costes de explotación asociados.

En cuanto al caso ejemplo mostrado, se pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. La distribución de la carga en vagones depende de las características de estos y los coeficientes de densidad y aprovechamiento; la distribución de los vagones en trenes depende de numerosos factores: unos de infraestructura (rampa, electrificación, carga por eje...); otros del tren (tracción, fuerza de los enganches) y otros de la explotación (velocidad mínima en rampa). Según los casos unos u otros inducen una caracterización del tren muy diferente.

2. Los costes de explotación y las emisiones de los trenes remolcados por máquina diésel están siempre muy por encima de los de los trenes remolcados por máquinas eléctricas, por lo que su uso solo está justificado en el caso de líneas no electrificadas.

3. El incremento de la longitud admisible de los trenes, despliega sus efectos positivos para trenes de productos ligeros y vacíos y afecta principalmente a los costes de explotación, con una reducción en torno al 18% al realizarse un incremento de la longitud del 33%.

4. La doble tracción para remolcar trenes muy pesados supone un incremento de los costes y las emisiones que no llega a ser el doble de los trenes traccionados por una única locomotora. Las emisiones en la línea León Gijón se incrementan entre un 5 y un 10% y los costes un 40%.

5. El incremento de la carga por eje es interesante en el caso de trenes densos pues supone una reducción de los costes y las emisiones. Un incremento del 11% de la carga por eje supone una reducción de las emisiones del 7% y de los costes del 10%.

#### **4. Agradecimientos**

La autora quiere expresar su agradecimiento a Alberto García, Vicente Rallo, Lorenzo Jaro, Ismael Borregón, Cristina Barbero, Juan Miguel Sastre y Eduardo Pilo.

#### **5. Referencias bibliográficas**

[1] ADIF (2010). Cuadro de cargas máximas. Adif, Madrid.

[2] ESTRADA GUIJARRO, J. (2010). Conceptos generales de gestión de capacidad. Documentos de explotación técnica y económica del transporte. Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios.

[3] RALLO GUINOT, V. (2008). Monografía del Observatorio del Ferrocarril. Costes del transporte de mercancías por ferrocarril. Una primera aproximación para su estudio sistemático Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

[4] FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES e IDAE (2010). Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

[5] GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2009). Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diésel en el ferrocarril. Revista Anales de mecánica y electricidad, enero-febrero 2009.



# Estimación del consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> en trenes de mercancías y análisis de la variabilidad

## *Estimating the energy consumption and emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in freight trains and variability analysis*

Ignacio González Franco

*Área de investigación, formación y colaboración científica, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid, 28012, España*

---

### Resumen

En este artículo se caracterizan y se comparan el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se producen en el transporte de mercancías por tren.

En la estimación del consumo de energía de los modos de transporte suelen emplearse valores medios genéricos; pero así como los valores medios pueden, con muchas limitaciones, ser útiles en camiones o aviones, en el ferrocarril no lo son, debido a la enorme variabilidad de estos consumos. La variabilidad del consumo en el ferrocarril obedece a que los trenes son diferentes entre sí en cuanto al tamaño y tipos de tracción (eléctrica o diesel). Además, las líneas ferroviarias también presentan importantes diferencias, debido a la existencia de distinta severidad en los perfiles, el número de paradas y las velocidades.

Este estudio, demostrará la variabilidad mencionada, indicará que variables provocan esta variación y dará un orden de magnitud al consumo y emisiones generado por los diferentes trenes de mercancías.

Palabras clave: Emisiones de CO<sub>2</sub>, carga neta, petroquímico, porta-automovil, perfil de línea

### Abstract

*This paper characterizes and compares energy consumption and emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) produced in the transport of freight by rail. Average generic values are often used in estimating the energy consumption of transport modes, but while average values can, with many limitations, be useful in trucks or aircraft, this is not the case on the railway, due to the enormous variability in this consumption. The variability of fuel consumption on the railway is due to the fact that trains are different from each other in size and types of traction (electric or diesel). Furthermore, railways also have important differences, due to the differing severity in profiles, the number of stops and speeds.*

*This study will demonstrate the variability mentioned, also will indicate which factors cause a variation in energy consumption and emissions of the different freight trains, which are the parameters that have a higher incidence and their order of magnitude.*

*Keywords: Emissions of CO<sub>2</sub>, net tons; bulk petrochemicals, cars, profile*

---

## 1. Introducción

En el sector de transporte de mercancías por ferrocarril se produce un consumo de energía especialmente intensivo y sobretodo muy variable, es decir dependiendo de la carga que se transporta, el tipo de tracción utilizado, el número de trayectos que se realizan en vacío y el perfil de línea, se producen consumo y emisiones de CO<sub>2</sub> de diferente magnitud.

En este artículo se caracterizan y se comparan el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se producen en el transporte de mercancías por tren. En la estimación del consumo de energía de los modos de transporte suelen emplearse valores medios genéricos; pero así como los valores medios pueden, con muchas limitaciones, ser útiles en camiones o aviones, en el ferrocarril no lo son, debido a la enorme variabilidad de estos consumos. La variabilidad del consumo en el ferrocarril obedece a que los trenes son diferentes entre sí en cuanto al tamaño y tipos de tracción (eléctrica o diesel) (García Álvarez, 2011b). Además, las líneas ferroviarias también presentan importantes diferencias, debido a la existencia de distinta severidad en los perfiles, el número de paradas y las velocidades.

En otros medios de transporte, esta variabilidad es muy baja, los consumos y emisiones se mantienen en un rango pequeño, como es el caso del transporte por carretera, en el que el consumo no varía demasiado de unos tipos de camiones a otros y no les afecta excesivamente la carga que es transportada.

Debida a estas razones, se considera que es importante indicar qué factores provocan esta variación, cuáles son los parámetros que tienen una mayor incidencia y el orden de magnitud de los mismos, para poder demostrar la existencia de una gran variabilidad.

El conocimiento de un orden de magnitud del consumo de energía, para cada tipo de producto y de tracción, permitirá mejorar la eficiencia del transporte de mercancía, generará un beneficio social y medioambiental y además aportará una herramienta que influirá en la toma de decisiones del operador, permitiendo una reducción en sus costes de explotación.

## 2. Metodología empleada e hipótesis de cálculo

La energía consumida por los vehículos puede descomponerse en cuatro puntos de control (García Álvarez, 2011b)

- Energía “útil”. Es la consumida por el movimiento de los trenes, más la energía consumida para los servicios auxiliares, medida en llantas del vehículo.

- Energía “final” que entra al tren. Es el resultado de sumar la energía “útil”, con la energía que se pierde en los procesos de transformación que se producen dentro de la locomotora (cadena de tracción, generación de la energía embarcada...).

- Energía suministrada al sistema ferroviario. Es diferente a la anterior en casos en los que se requiere un transporte o almacenamiento previo a la entrada de la energía en el vehículo.

- Energía “primaria”. Es el resultado de sumar a la energía del punto anterior, la que se pierde en los procesos de extracción, transporte, generación y de conversión que se producen desde fuentes primarias de energía hasta el punto de entrega al sistema ferroviario (pérdidas de extracción, refino, transporte, generación de electricidad...).

Debe señalarse que el consumo de energía “útil” se puede producir en varias fases o etapas del ciclo de uso de los vehículos. Entre ellas, la más importante es aquella en la que el vehículo se está moviendo para realizar el transporte “crucero”.

### 2.1. Modelo de cálculo del consumo energético

El cálculo de la energía consumida por un vehículo para su movimiento puede hacerse:

- Por integración de las fuerzas que en cada instante actúan sobre él, modelos “de arriba a abajo”
- Por el balance de energía en un recorrido, modelo “de abajo a arriba”

El primer enfoque es más preciso y resulta más útil para diseño de conducción económica, o el dimensionamiento del sistema eléctrico (en general de cualquier proceso que requiera conocer los consumos

instantáneos) pero no facilita información sobre la desagregación del consumo por cada una de las causas que lo producen, que es precisamente la ventaja de segundo procedimiento, y la razón por la que se emplea este procedimiento de balance de energía en este estudio.

En el segundo enfoque para calcular el total de la energía suministrada al vehículo, se estudia un “recorrido circular” con el vehículo en el origen y en el final parado (con velocidad inicial y final igual a cero). De esta manera, la energía potencial en el conjunto del recorrido no varía (es tanta la altura que ha ganado el vehículo como la que ha perdido), ni tampoco cambia la energía cinética. Entonces, no hay variación de la cantidad de energía almacenada en el vehículo en el conjunto del viaje de ida y vuelta; y por ello, la energía que ha entrado al vehículo (más las pérdidas) es igual a la que ha salido del mismo; y la energía que ha entrado (energía “final”) se puede calcular a través de la energía que ha salido (energía “útil”).

Se puede esquematizar el funcionamiento energético del movimiento del tren sabiendo que en cada instante, el tren debe vencer una fuerza que se opone a su avance, y recibir además energía necesaria para aumentar su velocidad, o su altura; y que en algunos tramos cede una cantidad de energía, como consecuencia de una reducción de su velocidad o pérdida de altura.

Por lo tanto, en su movimiento (y con independencia del consumo de energía para los servicios auxiliares), los trenes reciben energía fundamentalmente:

- Para vencer la resistencia al avance (depende de la masa del tren, de su velocidad, de que circule en cielo abierto o en túnel, de las curvas, de la cantidad de aire que entra en el tren y del viento) (García Álvarez, 2011a).

- Para incrementar su velocidad, tanto en el origen del viaje como después de cada parada; y, en general, en cada uno de los puntos en que se aumenta la velocidad. Un incremento de la velocidad del tren requiere una importación de energía, pero conlleva un aumento de la energía cinética acumulada en él.

- Para aumentar su altitud: cada vez que el tren supera una rampa, su altitud aumenta y por ello recibe una cierta cantidad de energía que acumula en forma de energía potencial.

Por el contrario, los trenes ceden energía:

- Cuando reducen su velocidad, tanto en una parada como en cualquier momento en que el tren pasa de una velocidad mayor a una velocidad menor (por ejemplo, en una limitación de velocidad), se produce una cesión de energía cinética

- Cuando pierden altitud al circular por una pendiente, ya que entonces disminuye la energía potencial.

En definitiva, el consumo de energía final (importada en pantógrafo) puede calcularse a partir de la siguiente expresión

$$E_{\text{Nantas}} = E_{\text{Ravance}} + E_{\text{cinética}} + E_{\text{potPendientes}} + E_{\text{PorDifAlturas}} + E_{\text{aux}} \quad (1)$$

$$E_{\text{Ravance}} = \left( (A + A_c) \times M + B \times V_{\text{med}} + \left( \overline{V^2} + \delta_v^2 \right) \right) \times L_{\text{linea}} \times \frac{1}{360} \quad (2)$$

$$E_{\text{cinética}} = \frac{N_{\text{paradas}}}{3,6^3 \cdot 10^3} \left( \frac{1}{2} \times (M_{\text{carg}} + M_{\text{rot}}) \times V_{\text{med}}^2 - \left( \frac{A \times V_{\text{med}}^2}{2 \times d} + \frac{B \times V_{\text{med}}^3}{3 \times d} + \frac{C \times V_{\text{med}}^4}{4 \times d} \right) \times \frac{1}{10^2} \right) \quad (3)$$

$$E_{\text{potPendientes}} = M_{\text{carg}} \times g \times \sum \left( \frac{(P_{\text{real}} - P_{\text{equilibrio}}) \times l_{\text{pendiente}}}{L_{\text{linea}}} \right) \times \frac{1}{3.600} \quad (4)$$

$$E_{\text{PorDifAlturas}} = M_{\text{carg}} \times g \times (h_f - h_i) \times \frac{1}{3.600} \quad (5)$$

$$E_{aux} = Pot_{aux} \times T_{viaje} \times 0,7 \quad (6)$$

Donde:  $L_{linea}$  es la longitud total del recorrido (km),  $A$  coeficiente de resistencia a la rodadura por fricción mecánica (daN/t),  $A_c$  coeficiente de resistencia a la rodadura en curvas (daN/t),  $M_{carg}$  masa cargado del vehículo (t),  $M_{rot}$  masa rotativas del vehículo (t),  $B$  coeficiente de entrada del aire (daN/(km/h)),  $V_{med}$  velocidad media del vehículo (km/h),  $C$  coeficiente de resistencia aerodinámica (daN/(km/h)<sup>2</sup>),  $\delta$  desviación típica respecto a la media (excluyendo tiempos de parada),  $d$  deceleración disponible por el tren (m/s<sup>2</sup>),  $N_{paradas}$  número de paradas que tiene la línea,  $P_{real}$  pendiente real en la que se encuentra el vehículo (mm/m),  $P_{equilibrio}$  pendiente de equilibrio (mm/m),  $l_{pendiente}$  longitud de la pendiente (km),  $g$  aceleración de la gravedad, 9.8 (m/s<sup>2</sup>),  $hf$  altura final del trayecto (m),  $h_i$  altura inicial del trayecto (m),  $Pot_{aux}$  Potencia de los auxiliares (kW),  $T_{viaje}$  Tiempo de viaje .

La influencia de cada uno de los consumos (y por ello de las variables que inciden sobre ellas) es muy diferente según el tipo de servicio, por lo que resulta útil presentar algunos casos concretos, lo que permite evaluar el valor absoluto y peso relativo de cada uno de estos consumos.

Para tratar de orientar sobre la importancia de cada una de las variables que inciden en el consumo de un vehículo, se han aplicado las fórmulas anteriores a trenes de mercancías (de diversos productos y diferente tracción).

## 2.2. Hipótesis de cálculo

Para el cálculo tanto del consumo de energía como para las emisiones de CO<sub>2</sub>, los indicadores utilizados son:

1. Energía en barras de la central de generación (eléctrica): es la energía eléctrica medida a la salida de la central generadora de energía eléctrica. Se calcula con la energía que entra en la subestación del ferrocarril multiplicada por el coeficiente de pérdidas en el transporte y la distribución de la electricidad (Pilo de la Fuente, Eduardo & Pérez Arriaga, 2009) .
2. Energía suministrada al vehículo en el tren diesel: es la energía consumida por el vehículo. En este caso, toda la energía consumida es de origen fósil (Lopez Martínez, Sánchez Alejo, Gómez, & Fernández, 2009).
3. Emisiones de CO<sub>2</sub>: se calculan a partir de la energía en barras de la central de generación (tracción eléctrica) o en pozo de petróleo (tracción diesel). Para el cálculo se multiplican los kWh consumidos por los gramos de CO<sub>2</sub> emitidos por kWh (en España, 2009, 233 gramos de CO<sub>2</sub> por kilovatio-hora) (Observatorio de la electricidad 2009); o los litros de gasóleo por el factor de emisiones (2.633 gramos de CO<sub>2</sub> por litro) y se añaden las emisiones en el proceso “well to tank” (14,58 g/MJfinal)

Las unidades utilizadas (tanto para la energía en barras de la central como en boca del depósito) son kWh/ (tonelada\_neta•kilómetro); y las unidades utilizadas para las emisiones de dióxido de carbono son gramos de CO<sub>2</sub> por tonelada\_neta•kilómetro.

En el sector de transporte de mercancías por ferrocarril se produce un consumo de energía especialmente intensivo y muy variable. El consumo varía dependiendo de la carga que se transporta, el tipo de tracción utilizado, el número de trayectos que se realizan en vacío, del perfil de línea. Para cada valor de cada uno de ellos se producen consumos de energía y gases de efecto invernadero de diferente magnitud.

En otros modos de transporte, esta variabilidad es menor: los consumos y emisiones se mantienen en un rango reducido, como es el caso del transporte por carretera, en el que el consumo no varía demasiado de unos tipos de camiones a otros y no les afecta excesivamente el tipo de carga que se transporta.

Debido a estas razones, es importante indicar qué factores provocan esta variación y cuáles son los parámetros que tienen una mayor incidencia así como el orden de magnitud de los mismos. Se han simulado los consumos de diversos tipos de trenes con distintas locomotoras, productos transportados y tamaños para obtener una idea de los consumos en cada caso.

### 3. Características de los trenes, material y de las líneas

A continuación se muestran las características del material rodante utilizado en la simulación, las líneas que se consideran representativas y el tipo de vagones utilizados.

Las máquinas utilizadas han sido, una locomotora diésel de la serie 335 y una eléctrica de la serie 251 de Renfe, cuyas características principales se resumen en la tabla 1 y 2.

Tabla 1. Características de locomotora diésel 335



Tipo	Diésel	
Masa (t)	124	
Longitud (m)	23,0	
Potencia (kW)	3.178	
Ejes	6	
Velocidad máxima teórica (km/h)	160	
Tensión (V)	No	
Esfuerzo máximo en el arranque (kN)	400	
<i>Fuente: Elaboración propia</i>		

Tabla 2. Características de locomotora eléctrica 251

Tipo	Diésel	
Masa (t)	138	
Longitud (m)	20,7	
Potencia (kW)	4.650	
Ejes	6	
Velocidad máxima teórica (km/h)	100	
Tensión (V)	3000	
Esfuerzo máximo en el arranque (kN)	453	
<i>Fuente: Elaboración propia</i>		

#### 3.1. Tipos de mercancía (productos) y vagones

Los tipos de mercancías (productos) a transportar para los que se ha hecho la simulación son: automóviles, graneles, siderúrgicos planos y petroquímicos. Para el transporte de cada uno de ellos se han empleado los vagones de uso más extendido para el producto concreto, cuyas características se muestran en las siguientes tablas (Rallo Guinot, 2010)

Tabla 3. Características vagones empleados en el estudio

Vagón MA5 2p transporte de automóviles		Vagón TT5 para transporte de graneles	
Ejes	4	Ejes	4
Carga máxima (t)	22,0	Carga máxima (t)	54,5
Tara media (t)	27,7	Tara media (t)	25,5
Longitud entre topes (m)	27,00	Longitud entre topes (m)	14,24
Longitud interior caja (m)	52,20	Longitud interior caja (m)	
Velocidad máxima (km/h)	100	Velocidad máxima (km/h)	100
Fuerza admisible de enganches (kN)	360	Fuerza admisible de enganches (kN)	360
Vagón JJ92 para transporte de siderurgicos		Vagón RR92 para transporte de Petroquímicos	
Ejes	4	Ejes	4
Carga máxima (t)	71,0	Carga máxima (t)	65,5
Tara media (t)	25,3	Tara media (t)	24,5
Longitud entre topes (m)	12,04	Longitud entre topes (m)	16,74
Longitud interior caja (m)	10,80	Longitud interior caja (m)	
Velocidad máxima (km/h)	120	Velocidad máxima (km/h)	120
Fuerza admisible de enganches (kN)	360	Fuerza admisible de enganches (kN)	360

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Líneas recorridas

La simulación de todas las composiciones se ha realizado para dos líneas: una con un perfil suave (Valladolid-León), y otra de perfil montañoso (León-Gijón).

La línea de Valladolid-León tiene una rampa característica 12 milímetros por metro (mm/m), está electrificada a 3 kilovoltios en corriente continua, permite una velocidad máxima de servicio de 100 km/h y no tiene paradas intermedias. La velocidad media en la marcha, tanto para los trenes de mercancías eléctricos como para los diesel, es de 70 km/h, similar a la que obtienen en la práctica los trenes de mercancías en España.

La línea León-Gijón con una rampa característica de 22 mm/m está también electrificada a 3 kilovoltios en corriente continua, siendo la velocidad máxima del servicio de 100 km/h. Se ha simulado sin paradas intermedias. La velocidad media observada es de 70 km/h, similar a la que obtienen en la práctica los trenes de mercancías en España (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2009)

Tabla 4. Principales características de las líneas

		Perfil			
		Suave		Montañoso	
Línea		Valladolid-León		Gijón-León	
Paridad		Par	Impar	Par	Impar
Longitud	(km)	171,2	171,2	171,6	171,6
Longitud túneles	(km)	7,17	7,17	7,19	7,19
Factor de túnel		1,2	1,2	1,2	1,2
Tensión de Alimentación	(kV)	3kV CC	3kV CC	3kV CC	3k CC
Diferencia de Altitud	(m)	-143	143	833	-833
Coefficiente de curvas		0,4	0,4	1,2	1,2
Exceso de alturas		308	525	1.878	5.908,6
Paradas técnicas		1	1	1	1
Velocidad máxima de servicio	(km/h)	100	100	100	100
Velocidad media de servicio	(km/h)	70	70	70	70
Paradas equivalentes por reducción de velocidad		1,39	1,39	3,99	4,06
Rampa característica máxima	(mm/m)	10	12	23	22

Fuente: Elaboración propia



#### 4. Calculo de la energía y emisiones de los diferentes trenes de mercancías en una línea con un perfil suave

En este apartado se cuantifica el consumo de energía y emisiones de los trenes de mercancías, para cada uno de los productos (porta-automóviles, petroquímicos, graneles y siderúrgicos) para cada tipo de tracción (tabla 2 y 3) y para una línea de perfil suave.

El consumo y emisiones se calculan en función de las toneladas netas y los kilómetros del recorrido, es decir se varía la carga neta que es capaz de transportar el tren (para cada uno de los productos), por lo tanto para cada carga neta (toneladas transportadas) existe una composición del tren (una longitud, una masa cargado...). Una vez determinadas estas características del tren para cada tonelada neta transportada y conocidas las características de la línea (velocidad media, coeficiente de curvas...) (tabla 4) se obtiene el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, permitiendo así una comparación homogénea entre los diferentes trenes que se pretenden estudiar.

En las figuras 1 y 2, se muestran de manera sencilla, para cada uno de los productos y tipo de tracción y sobre todo para cada valor de carga transportada (carga neta), cuál es la composición más eficiente y las diferencias que existen entre cada una de ellas.

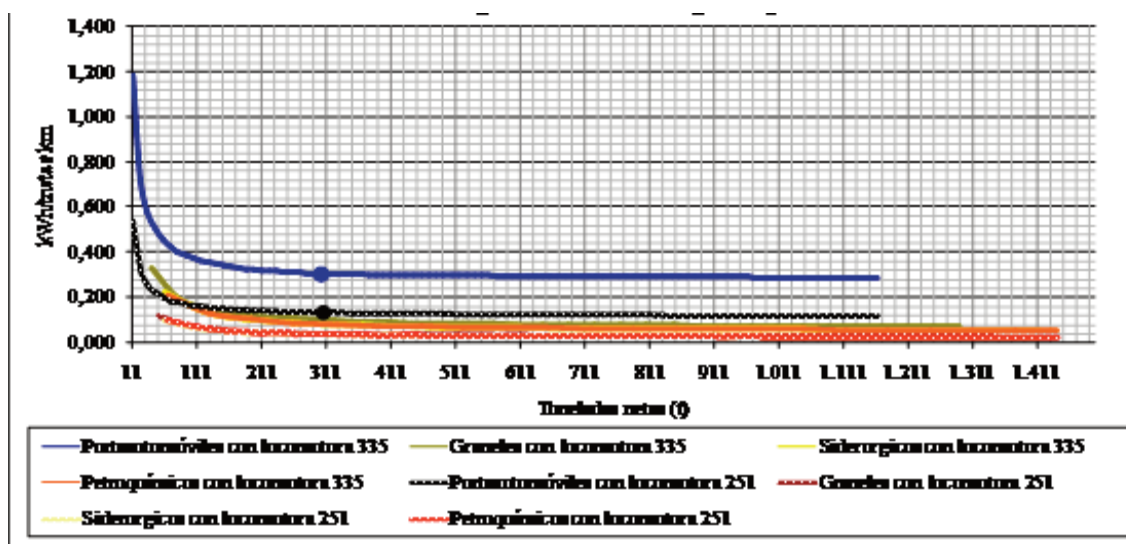


Figura 1. Consumo de energía (kWh/tmeta\*km) por tonelada neta transportada

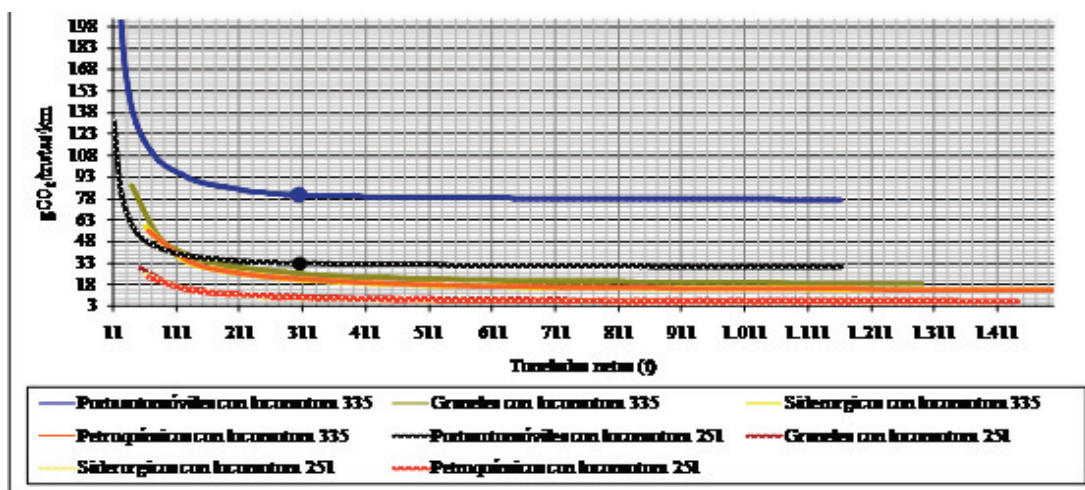


Figura 2. Emisiones de energía (gCO<sub>2</sub>/tmeta\*km) por tonelada neta transportada

En el caso de los porta-automóviles se han calculado los consumos y emisiones para cargas netas mayores a la capacidad propia de los trenes de mercancías representativos de la red ferroviaria española, esto permite realizar una comparación más clara con los demás productos transportados, de ahí que se han calculado consumos ni emisiones para cargas netas mayores de 350 toneladas, ya que con estas cargas se necesitarían trenes con 30 vagones de 27 metros cada uno de ellos, lo que supone trenes de más de 750 metros de longitud.

Tras los cálculos realizados, las conclusiones a las que se llegan son diversas y complejas, por esta razón se dividirán en cuatro apartados, que permitirán una mayor comprensión.

#### 4.1. Diferencias entre tráfico diesel y eléctrico

De las figuras 1 y 2 se obtiene:

Los trenes remolcados por máquina diesel tienen unas emisiones de dióxido de carbono y unos consumos de energía aproximadamente entre 2,3 y 2,9 veces mayor que las composiciones eléctricas, a igualdad de tamaño del tren (y por ello, de toneladas netas de carga) y en una línea de perfil suave.

En la siguiente tabla 5, se muestra la relación existente entre las composiciones diesel y las eléctricas, en cuanto a sus emisiones y consumos de energía.

Tabla 5. Comparativa entre tracción diesel y eléctrica para transporte de los diversos productos

	Consumo	Emisiones
	kWh Diésel/kWh Eléctrico	CO <sub>2</sub> Diésel/CO <sub>2</sub> Eléctrico
<i>Portaautomóviles</i>	2,3	2,4
<i>Graneles</i>	2,7	2,9
<i>Siderúrgicos</i>	2,3	2,4
<i>Petroquímicos</i>	2,3	2,4
<i>Fuente: Elaboración propia</i>		

Esta diferencia entre la tracción diesel y eléctrica está en la línea de lo apuntado en (García Álvarez & Martín Cañizares, 2009).

#### 4.2. Efecto del tamaño del tren

Para el mismo producto y el mismo tipo de tracción, las emisiones y el consumo se reducen a medida que se aumenta la carga del tren (por ejemplo si se observa la figura 1, para cargas de 121 toneladas netas en el transporte de graneles y para tracción diésel el consumo de energía es de 15,2 kWh por tonelada neta cada 100 kilómetros; mientras que para trenes de 443 toneladas netas, el consumo baja a 8,8 kWh por tonelada neta cada 100 kilómetros). A partir de las 300 toneladas netas los consumos y emisiones se estabilizan y se mantienen prácticamente independientes del tamaño del tren (obsérvese figuras 1 y 2)

La alta sensibilidad del consumo y energía y de las emisiones al tamaño del tren es característica de los servicios de mercancías, pues éstos son siempre remolcados por locomotora, y por ello, la energía necesaria para mover la propia locomotora “se diluye” entre la carga a medida que aumenta tamaño del tren. Esto nos lleva a afirmar que, trenes de mercancías largos (gran longitud) son más eficientes.

#### 4.3. Diferencias por productos

En los resultados presentados en las figuras 1 y 2, se aprecia que el caso de transporte de automóviles es distinto a los demás. La limitación en el número de automóviles que se pueden transportar en cada vagón no es

debida al peso, sino al volumen de la carga (en este caso, a la longitud de los coches). Ello da lugar a que la relación entre la tara del vagón y la carga neta transportada es muy alta. Por ejemplo, una plataforma porta-automóviles MA5 de dos pisos, suponiendo que la longitud media de un automóvil es de 4 metros, puede cargar 11,75 vehículos que equivalen aproximadamente a 11,75 toneladas. Por tanto, por cada tonelada neta se necesitan 2,36 toneladas de tara del vagón. En petroquímicos, por ejemplo, por cada tonelada neta se precisan 0,37 toneladas de tara del vagón.

Se comprueba que para las mismas toneladas netas transportadas e igual tamaño del tren, los consumos por tonelada transportada de los trenes de diferentes productos son prácticamente iguales entre sí, exceptuando el caso de los trenes porta-automóviles cuyo consumo por tonelada es aproximadamente 4 veces mayor. Esto es debido a lo comentado anteriormente, se transporta poca carga para la misma longitud de tren que otros productos.

Al ser prácticamente iguales los consumos y emisiones de los trenes de productos “densos”, para los sucesivos cálculos se utilizará un tren de referencia que será una composición de productos petroquímicos, ya que como se ha mostrado se estará hablando también de los productos siderúrgicos y de graneles y reducirá el número de cálculos

#### *4.4. Recorridos en vacío*

Existe un parámetro que afectan indirectamente al consumo, que es coeficiente de recorridos en vacío. Cada tren cargado genera un determinado número de trenes vacíos. Un tren que vuelve vacío también consume energía y este consumo se le debe imputar a las toneladas netas transportadas en el sentido contrario. Por ejemplo, en el caso de transporte de graneles el coeficiente de recorridos en vacío es uno (ya que un tren cargado genera un tren vacío), pero para el caso de porta-automóviles es de 0,8 (cada tren cargado necesita “solo” 0,8 trenes vacíos).

### **5. Comparativa entre consumos y emisiones según perfil de línea**

Una vez determinados los consumos y las emisiones en un perfil suave y para observar la influencia que tiene el perfil de la línea en el consumo y en las emisiones de dióxido de carbono, se realiza una comparativa de dos productos distintos en dos líneas con un perfil diferente. Una línea de perfil suave (Valladolid- León) y otra línea de perfil montañoso (León-Gijón).

En este cálculo se utilizan dos tracciones distintas (eléctrica y diésel) al igual que en el caso anterior, y dos productos: el petroquímico, producto de considerado el representativo de los “densos”; y el de transporte de automóviles, considerado “ligero”.

Se considera que cada una de las cuatro composiciones que se han escogido, transportan 200 toneladas netas.

Además, en este punto en el caso de la línea montañosa, para el cálculo de consumos y emisiones se tienen en cuenta ambos sentidos de la marcha, ya que hay diferencias significativas entre un sentido y otro. En las siguientes gráficas 3 y 4 y en la tabla 5, se puede observar los consumos y las emisiones obtenidas en el caso analizado

Tabla 6. Comparación de consumos y emisiones, en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañoso para diversos tipos de productos

Toneladas netas = 200 t	Eléctrico		Diésel	
	kWh/tnetas.km	CO <sub>2</sub> (g/tnetas.km)	kWh/Tnetas.km	CO <sub>2</sub> (g/tnetas.km)
Petroquímico perfil suave	0,04	11,27	0,102	26,8
Petroquímico perfil montañoso	0,08	22,64	0,224	58,78
Relación Montaña/ perfil suave	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>
Portaautomoviles perfil suave	0,14	35,13	0,32	84,89
Portaautomoviles perfil montañoso	0,25	63,34	0,58	152,14
Relación Montaña/ perfil suave	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>

*Fuente: Elaboración propia*

Puede observarse que la diferencia entre los dos tipos extremos de línea son muy significativas, con cocientes entre 2 y 2,2 para los mismos trenes “densos”, y una diferencia de 1,8 para los trenes “ligeros”. Es decir que, el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, de un tren, sea cual sea el producto transportado, es aproximadamente el doble si se circula en un perfil montañoso, que si circulan en un perfil suave.

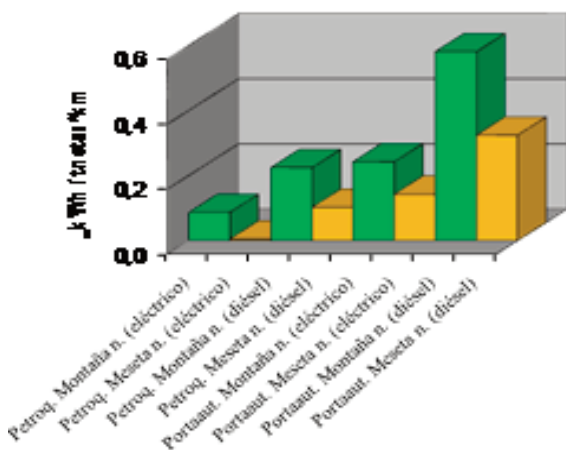


Figura 3. Comparativa de los consumos generados en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañoso para transporte de diversos tipos de productos

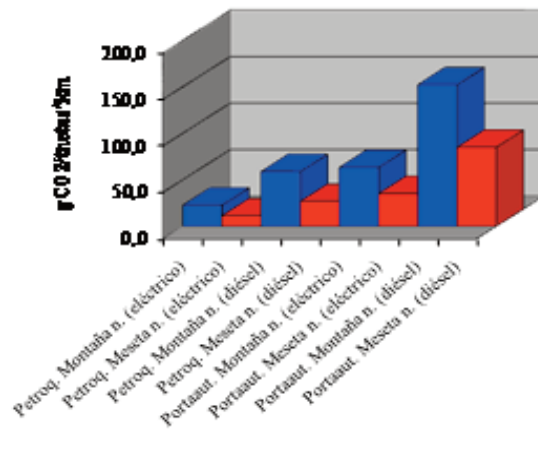


Figura 4. Comparativa de las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en una línea de perfil suave y una línea de perfil montañoso para transporte de diversos tipos de productos

Además, las figuras 3 y 4 nos indican que el transporte de mercancías “ligeras” con tracción diesel en un perfil montañoso, se convierte en la explotación menos eficiente de todas, siendo la más eficiente el transporte de mercancías “ligeras” en un perfil suave

## 6. Conclusiones

Como se ha demostrado en este estudio, afirmar que el consumo de un tren de mercancías es de un valor determinado sin hacer ninguna reflexión al respecto, pues nos llevaría a cometer un gran error. Se ha demostrado la alta variabilidad de consumos y emisiones que presenta la explotación de trenes de mercancías, mostrando aquellas variables que afectan más al cálculo y la diferencia existente entre todas ellas.

Finalmente, a partir del consumo de energía y las emisiones generado por un producto de referencia (petroquímicos “densos”), para un transporte de 200 toneladas, tracción diesel y en una línea de perfil suave, (es el de 11,273 kgCO<sub>2</sub>/(tonelada\_neta kilómetro) es posible estimar el orden de magnitud y las emisiones de las diferentes composiciones multiplicando la de referencia por los siguientes valores:

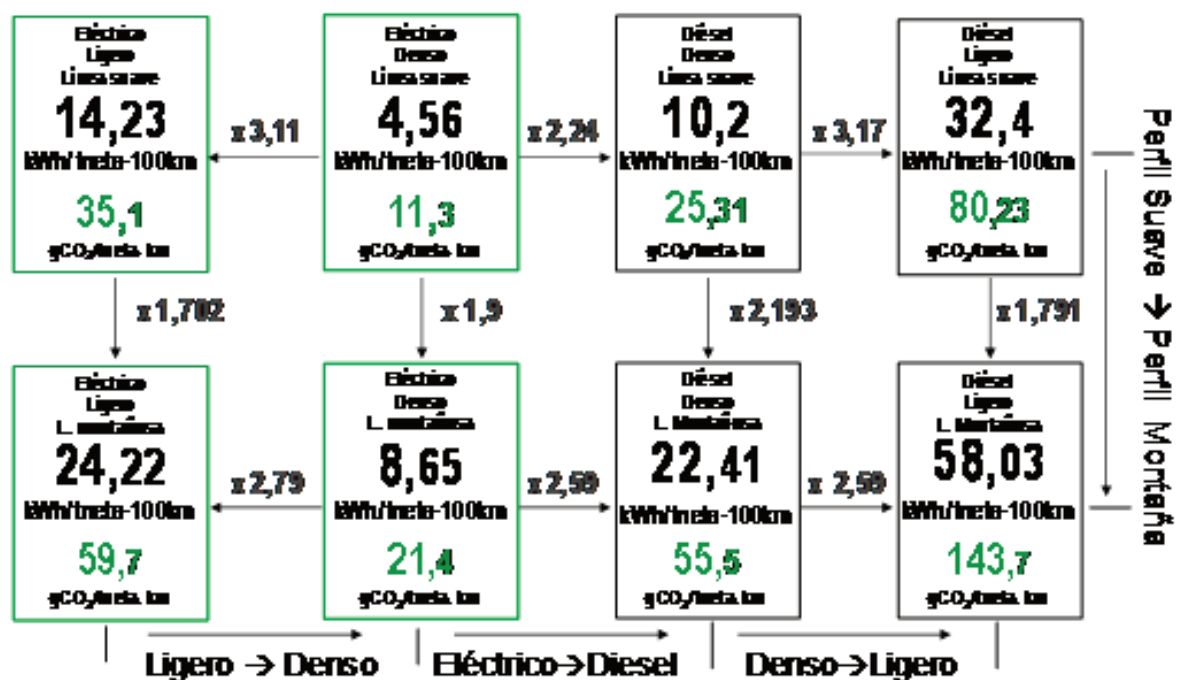
Para determinar el consumo de una composición con tracción diesel se multiplica el consumo del producto referencia por un valor que oscila entre 2,3 y 2,9.

Para determinar el consumo de un tren portaautomóviles de tracción eléctrica que transporta 200 toneladas netas (ligero), se multiplica las emisiones del producto de referencia (“denso”) por un valor que oscila entre 3 y 3,2.

Para determinar el consumo de energía en una línea montañosa, a partir de una línea de perfil suave se multiplican las emisiones, en el caso de trenes “densos” por un factor que oscila entre 2 y 2,3 y para el caso de trenes “ligeros” el factor varía entre 1,7 y 1,8.

Para determinar el consumo de trenes de mayor longitud, hay que acudir a las gráficas anteriores. A partir de 300 toneladas netas (al aumentar la carga transportada, aumenta la longitud de los trenes) transportadas en todas las composiciones, su consumo y emisiones tienen una tendencia asintótica, es decir que se mantienen prácticamente constantes.

A continuación, se muestra una figura resumen de todos los cálculos realizados, que muestra además la gran variabilidad existente en los trenes de mercancías (del orden de 13 veces). Demuestra también, que si se toma un tren eléctrico en un perfil suave (4,56 kWh/tmeta.km) como referencia, es posible calcular los consumos y emisiones para los demás casos, simplemente con el conocimiento de las diferencias que existen entre las variables analizadas (tracción diesel, eléctrica; perfil suave, montañoso; producto petroquímico, porta-automóvil...).



Tren ligero: Portaautomóviles de 200 toneladas netas y 808,56 toneladas brutas  
 Tren denso: Petroquímica, de 200 toneladas netas y de 408 toneladas brutas  
 En todos los casos, se incluye la parte proporcional de los consumos de los trenes vacíos

Figura 5. Consumo y Emisiones de CO<sub>2</sub> (por tonelada neta cada 100 kilómetros) en un tren ligero y en un tren denso de 200 toneladas netas en dos tipos de línea con tracción eléctrica y diésel

## **7. Referencias**

- [1] Fundación de los Ferrocarriles Españoles. (2009). Observatorio del Ferrocarril en España No. M-2836262-2011)
- [2] García Álvarez, A. (2011a). In García González-Román L. (Ed.), *Dinámica de los trenes de alta velocidad* (Fundación de los Ferrocarriles Españoles ed.). Madrid:
- [3] García Álvarez, A. (2011b). In García González-Román L. (Ed.), *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril* (Fundación de los Ferrocarriles Españoles ed.). Madrid.
- [4] García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. P. (2009). Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diésel en el ferrocarril., 56.
- [5] López Martínez, J. M., Sánchez Alejo, J., Gómez, Á., & Fernández, Á. (2009). *Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- [6] Observatorio de la electricidad (2009). In WWF España (Ed.),
- [7] Pilo de la Fuente, Eduardo, & Pérez Arriaga, J. I. (2009). *Flujos de la energía de la electricidad para el transporte*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- [8] Rallo Guinot, V. (2010). *Capacidad de los trenes*. Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios ICAI:

# Instalación para el estudio de la propagación de ondas de presión en conductos y su aplicación en túneles para trenes de alta velocidad

## *Experimental set-up for the study of pressure waves propagation in ducts and its application in tunnels for high speed trains*

Félix Sorribes Palmer\*, Oscar López García

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

---

### Resumen

Se ha construido una instalación experimental de bajo coste para realizar ensayos a escala de la onda de compresión que se generan en el interior de un túnel al introducirse en él un tren a alta velocidad, con el fin de estudiar posibles configuraciones para reducir la presión de la onda reflejada en la salida. El coeficiente de reflexión de varias terminaciones ha sido medido y la influencia de la porosidad en la salida ha sido evaluada utilizando el método de la pulsoreflectometría acústica.

Palabras clave: ondas de presión, trenes de alta velocidad, túnel

### Abstract

*A low-cost experimental facility has been built to perform scale measurements of the pressure waves generated by a high speed train entering inside a tunnel, in order to study possible configurations to reduce the pressure reflected back at the tunnel exit. The reflection coefficient of some tunnel terminations has been measured and the influence of the porosity at the exit has been evaluated by using the Acoustic Pulse Reflectometry method (APR).*

*Keywords: pressure waves, high speed trains, tunnel.*

---

## 1. Experimental set-up for the study of pressure waves propagation in ducts and its application in tunnels for high speed trains

### Nomenclature

$\alpha$  Attenuation constant of the pressure waves inside the duct

$\eta$  Dynamic viscosity of the air,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$

$f$  Frequency, Hz

$\omega$  Sound pulsation,  $rad \cdot s^{-1}$

$\rho$  Air density,  $kg \cdot m^{-3}$

$\Delta p_{fr}$  Increase in pressure due to friction effects caused by the entry of the main part of the train into the tunnel, Pa

$\Delta p_{HP}$  Drop in pressure caused by the passing of the train head at the measurement position in the tunnel, Pa

$\Delta p_N$  Increase in pressure caused by the entry of the nose of the train into the tunnel, Pa

\*Email autor de contacto: felix.sorribes@upm.es

$\Delta p_T$	Drop in pressure caused by the entry of the tail of the train in the tunnel, $Pa$
$A$	Cross-sectional area of the tunnel, $m^2$
$a$	Inner radius of the cylindrical PVC, $m$
$A_0$	Cross-sectional area of the train, $m^2$
$c_0$	Speed of sound in the air, $m \cdot s^{-1}$
$\gamma$	Heat capacity ratio of the air
$\kappa$	Thermal conductivity, $w \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$cp$	Specific heat at constant pressure
$Pr$	Prantdl number
$Fe$	Scale factor between the microphones
$k$	Wave number, $m$
$Zc$	Characteristic impedance of cylindrical duct, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$D$	Tunnel diameter, $m$
$M$	Mach number
$q$	Volumetric velocity inside the tube
$R$	Reflection coefficient at the duct end
$U$	Train speed, $m \cdot s^{-1}$
$\sigma$	Perforated duct porosity

## Introduction

In order to introduce the work done in this article has been considered necessary a review of the researches done in high speed train's aerodynamics, specially related with pressure waves generated when the train is passing through a tunnel. The rapidly varying changes in pressure due to high speed train entering a tunnel and their reflections at the discontinuities in the tunnel can cause discomfort to the passengers.

When the train approaches the tunnel entrance the air inside the tunnel begins to be compressed due to the open-air local field preceding the train nose. When the head of the train reaches the tunnel entrance the pressure increases faster until the nose is completely inside the tunnel, this interaction between the entrance hood and the train nose determines the shape of the compression wave, but the total increase in pressure is  $\Delta p_N$ . The pressure continues increasing slowly due to the viscous effects on the tunnel wall and the train surface, until the end of the train reaches the tunnel entrance, and an expansion wave is generated  $\Delta p_T$ . The pressure decrease suddenly  $\Delta p_{HP}$  when the train nose passes the measurement point. The train reference signature defined by the standard EN14067-5:2006:E is shown in figure 1.

A good review of state of the art on the aerodynamic and aeroacoustic problems of high-speed railway train and the strategies to alleviate undesirable effects is made in Raghunathan et al. (2002). Raghunathan explains the influence in the quality of comfort, the safety of the passengers and the environment of the train's



aerodynamic drag, pressure variations inside train, train-induced flows, cross-wind effects, ground effects, pressure waves inside tunnel, impulse waves at the exit of tunnel, noise and vibration and the energy consumption. In it are also compiled some expressions to estimate: the train's aerodynamic drag, the pressure jumps of the compression wave generated at the entrance when the train enters into a tunnel and also the impulsive micro-pressure wave (MPW) which is radiated outside when the compression wave reaches the tunnel exit.

The aerodynamic phenomena during the entering of the train into the tunnel were treated theoretically in Hara (1961). The compression wave transient and its reflections in the tunnel during the train going through it are studied numerically in Zeng and Gretler (1995). A theoretical model for the pressure field in a tunnel generated by an entry of a travelling train modeled by a pair of moving monopoles into a semi-infinitely long tunnel is presented in Sugimoto and Ogawa (1997), the model is validated with CFD solving directly the Euler equations for inviscid and compressible gas.

An analytical investigation of the compression wave generated by a different train entering a tunnel and the influence in the wave shape of the train nose geometry is done at Howe (1997a). In this analytical solution the train is modeled by a uniformly translating continuous distribution of monopole sources whose density is proportional to the local gradient of the cross-sectional area of the train. The head wave is expressed as the convolution product of the sources and an acoustic Green's function whose determination is simplified at low Mach numbers, when the characteristic thickness of the head wave is large compared to the tunnel diameter. Also a second dipole of comparable strength is attributed to 'vortex sound' sources in the shear layers of the black-flow out of the tunnel of the air displaced by the train. The initial profile of the wavefront of the compression wave is determined principally by the train velocity, the blockage ratio, which is the ratio of the cross section area of the train and tunnel, the nose profile of the train, the shape of the tunnel entrance and the environment. The influence of the Mach number ( $M=U/c_0$ ) is studied in Howe (1997b) and the models are validated with the published experimental measurements presented by Maeda et al. (1993).

The effect of vents in the tunnel entrance portal in order to increase the rise time of the wave to alleviate the impulsive micro-pressure wave at the tunnel exit is analyzed in Howe (1998) and Howe (1999a). The maximum compression wave rise time that can be obtained with vents is equal to the time of passage of the front of the train through the perforated section. The Rayleigh's method for the approximate calculation of potential flow from the open end of a semi-infinite flanged cylinder is applied in Howe (1999b) to obtain analytical representations of the Green's function describing the generation of sound waves within a flanged cylinder by sources located in the neighborhood of the open end.

The pressure rise across the wave front  $\frac{\rho U^2}{1-M^2} \frac{A_0}{A} \left(1 + \frac{A_0}{A}\right)$  is given approximately in Howe et al. (2000). The amplitude of this pressure is typically 1-3% of the atmospheric pressure (around 150 dB) when the train Mach number exceeds about 0.2 (at 250 km/h). In this article is demonstrated that a "flared" portal entrance hood without windows behaves as an ideal hood producing a linear increase in pressure with distance across the wavefront, with a constant pressure gradient that is as small as practicable, but also implies a great increase in construction costs and space requirements.

The aerodynamic phenomena by a train traveling at high speed through a long tunnel is analyzed by means of quasi one-dimensional numerical simulation in Baron et al. (2001), in several tunnel configurations in order to establish tunnel design criteria for long-range underground high-speed railways, also the positive and negative effects of pressure relief ducts and partial air vacuum are discussed.

A reduce-scale (1/77) experimental set-up to study the compression wave generation is done in Bellenoue et al. (2002) and is validated with 3-D simulation, and with full-scale test published measurements. The generated compression wave is clearly established as planar wave after it has propagated four times the tunnel diameter inside the tunnel, and the 3-D model can be replaced by a 2-D (axially symmetric) model, saving this computational time. The optimal longitudinal cross section area distribution of the train nose, in order to increase

the rise time of the compression wave in the tunnel, can be deduce using axially symmetrical models, while drag and aerodynamic stability optimization in open air should be realized by means of 3-D models.

The resistance coefficients of the train from full scale measurements inside tunnel during routine operation were calculated in Vardy and Reinke (1999). In Bourquin et al. (2002) measurements of the propagation of pressure waves in a tube were undertaken and the change on shape due to unsteady viscous effects, as skin friction and heat transfer thanks to the length of the facility (112.3 m).

A theoretical analysis of the influence of the unvented hood geometry on the wavefront and its optimal size can be found in Howe et al. (2003a), and the optimal distribution and size of the windows in a vented hood is studied in Howe (2003b). The infrasound generated when a axisymmetric model of a train enters along the axis of a duct is studied in Howe (2003c). This low-frequency pressure pulses generated by the train entering and leaving the tunnel, so-called tunnel continues waves (TCW), is studied again in Kikuchi et al. (2009), also an interesting method of separation of incident wave from pressure data measured in tunnel is presented.

The influence of the train nose profiles in the generation of the wavefront is studied in Sato and Sassa (2005) numerical, together with an experimental set-up used to validate the results. The thickness of the wavefront can be made many times larger than its typical thickness order of 5 tunnel diameters  $D$ , when the wave is reflected at a tunnel exit with a discrete distribution of rectangular windows as shown in Howe and Cox (2005). The expansion wavefront reflected at the exit and the expansion wave caused by the inward propagating pulses generated at the windows are shown for a uniform and a linear 10 windows area distributions. A detailed analysis of the wave radiated from the portal reveals that cumulative nonlinear effects of propagation over long distances make little or no contribution to free space radiation of the micro-pressure wave. A compact algorithm that permits 'real-time' design studies of the compression wave generated by a train passing through a double-track tunnel entrance hood and the analytical model is validated with experimental results is formulated in Howe et al. (2006). This algorithm permits the designer to isolate the different contributions to the compression wave: the interactions of the train nose with the hood portal, the junction between the hood and the tunnel, the effect of the windows, and the contribution of the separated flow along the sides of the train. A genetically optimized tunnel-entrance hood (dimensions and distribution and sizing of the hood windows) is studied in Howe (2007) in order to reduce the maximum pressure gradient.

A method based on the signature of the pressure waves during their propagation inside the tunnel, required low CPU cost is presented in William-Louis y Tournier (2005). This method only predicts pressure changes but not the air temperature or velocity, and is only valid for simple tunnels (without cross-section changes, airshafts, etc...).

In Iida et al. (2006) an analytical method based on the aeroacoustic theory developed by Howe is applied to a short "acoustically compact" hood having a window on its side wall, and the boundary element method is used for calculating the potential flow through a portal of arbitrary geometry. A parametric analysis and an experimental study is performed in order to show the great influence of the relative length of the train nose to the distance between the window and the hood entrance in the performance of the hood. Another parametric numerical study of the micro-pressure wave is done in Kaoua et al. (2006).

The flow generated by train in a tunnel with side branches is studied in William-Louis and Tournier (1998). A method to predict the sound field in long enclosures with side branches is proposed in Liu, and Lu, (2009), the model proposed is validated with experiments, and with an acoustic modeling program ODEON. Field measurements and numerical simulation performed on the distortion of the compression wave generated by a train entry, and its propagation through a slab track with inclined side branches (with orifice-shaped apertures at the junction) tunnel is done in Fukuda et al. (2006). In Ricco et al. (2007) is also studied numerically an experimentally the pressure wave generated in the tunnel during the passing by of a high speed train

Numerical simulations of the flow field around high speed trains passing by each other inside a tunnel are done in Fujii and Ogawa (1995), Hwang and Lee (2000) and Hwang et al. (2001).

The pressure waves reflect at tunnel discontinuities such as changes in cross-sectional area, chimneys, airshafts, side branches and also every time that a wave finds the train. This multiple reflections can create localized regions where constructive interferences produces much higher pressure that can also affect to passengers and personnel within the tunnel.

A study of the sonic boom generated at the tunnel exit when the compression wave reaches the exit and a review of some passive and active alleviation methods is presented in Vardy (2008). The compression wave and the micro-pressure wave generated for a different hoods (linear horn, discontinuous, equal and enlarged cross-section with and without windows and gradient hood), using 3-D numerical simulations and moving-model experiments is presented in Liu et al. (2010). The optimal shape of the hood in order to diminish the micro-pressure wave is studied in Murray and Howe (2010).

The amplitude of the micro-pressure wave that emerges from the tunnel end is proportional to the gradient of the compression wave at the exit. In long tunnels (more than 3 km length) with modern concrete slab track the non-linear steepening progressively reduces the compression wave thickness, increasing the disturbance radiated from the tunnel end, which becomes similar in strength to a sonic boom. A ballasted track can be regarded as an effective porous sound absorbing material in the low-frequency range.

Two new methods for the prediction of the micro-pressure wave are proposed in Yoon and Lee (2001), the first method combines acoustic monopole analysis (generation of compression wave) and the method of characteristics (wave propagation inside tunnel) with the Kirchhoff formulation (computation of a micro-pressure wave), and the second method replaces the first two stages by 2D-3D Euler/Navier-Stokes solvers. In this article is concluded that the combined acoustic monopole analysis/method of characteristics-Kirchhoff formulation is very useful tool for preliminary design.

Most of the experimental set-ups launch an asymmetric train model through horizontal circular cylindrical pipe using a driving wheel, an air compressed chamber, or an elastic bundle. In Kim et al. (2003) is studied numerically and experimentally the distortion of a compression wave reflected from a baffled open end of a shock tube, the incident expansion wave is generated by a sudden rupture of a diaphragm.

This article is focused on the influence of the shape of the exit in the pressure that is reflected back inside the tunnel. For studying the reflection coefficient we have used a speaker to generate the pressure wave instead of using a scale train model projected at high speed along the axis of the duct. This fact extremely reduces the cost of the experimental setup, however just a part of the problem can be studied.

The reflected energy into the conduit can be determined by calculating the energy radiated outward. The study of acoustic radiation at the end of a circular unflanged duct without thickness, for a symmetric excitation is discussed in Levine and Schwinger (1948). This publication presents an analytical solution, valid for the frequency range in which acoustic waves inside the duct can be considered planes. In Norris and Sheng (1989) the acoustic radiation at the end of an infinite circular flanged duct is analyzed theoretically and approximated formulas are proposed for the reflection coefficient for a flanged and unflanged duct. The influence of the shape of the duct end on the pressure waves is analyzed experimental and numerically in Dalmont et al. (2001). In Selamet et al. (2001) different exits are analyzed numerically with the Boundary Element Method (BEM).

The effect of the radius of curvature of the extreme nonlinear losses is discussed in Atig et al. (2004) with the TMTC. The APR and TMTC method, outlining the advantages and disadvantages of each one are compared in Lefebvre et al. (2007). The acoustic pulse reflectometry does not require calibration since only a microphone is needed, although requires very long lines which makes it less portable installation than the installation TMTC, meanwhile with the TMTC method is easier to measure the impedance at high frequencies, but requires multiple microphones and precise calibrations increase the time of tuning the facility. Silva et al. (2009) proposed approximate formulas for the reflection coefficient of the flange and unflanged duct. The porous side walls have been previously studied in Nishimura and Ikeda (2008), comparing their efficiency in reducing the reflection coefficient at the end of the conduit for pressure waves of low frequency.

## Theoretical analysis

The equation of linearized pressure wave propagation in a perfectly smooth and rigid insulated conduit (Kinsler et al. (2000), Flecher and Rossing (1991)) is

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

where the instantaneous pressure  $p$ , inside the cylindrical tube depends on the distance to the sound source  $x$ , on the distance to the longitudinal axis of the duct  $r$ , on the angle of the point position with the horizontal axis  $\varphi$ , on speed of sound in the medium  $c_0$ , and on time  $t$ . Assuming axial symmetry, the solution of equation (1) is

$$p(r, x, t) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \sum_{n=0}^{n=+\infty} c_{mn} J_m \left( \frac{q_{mn} r}{a} \right) e^{i(k_{mn} x - \omega t)}, \quad (2)$$

$p(x=0, r, \varphi, t) = f_\omega(r, \varphi) e^{-i\omega t}$  where  $J_m$  is the Bessel function of first kind and the coefficients  $c_{mn}$  are obtained using the initial condition applying the orthogonality properties of Bessel functions, finally the coefficients are

$$c_{mn} = \frac{1}{\pi a^2} \frac{q_{mn}^2}{(q_{mn}^2 - m^2) J_m^2 \left( \frac{q_{mn} r}{a} \right)} \int_0^{2\pi} \int_0^a f_\omega(r, \varphi) J_m \left( \frac{q_{mn} r}{a} \right) e^{-im\varphi} r dr d\varphi. \quad (3)$$

The propagation mode  $(m, n)$  of an acoustic disturbance that propagates axially along the duct depends on the wave number  $k_{mn} = \sqrt{(\omega/c)^2 - (q_{mn}/a)^2}$ . The first propagation mode of the disturbance is a plane wave  $K_{00} = (\omega/c)$ , in which there are not traversal displacements. The condition of propagation of an acoustic mode is that the wave number must be real  $K_{mn}$ , otherwise the wave will decay exponentially and this is known as an evanescent wave. The lowest zero of the Bessel function is  $q_{11} = 1.8412$ , therefore the cut off frequency is

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1.8412c}{a} \frac{1}{2\pi}. \quad (4)$$

Four diameters inside the tube from the sound field is primarily unidimensional and the equation (1) can be written as

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - k^2 \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

where  $K = (\omega/c_0)$  is the wave number and  $p(x, t) = \text{Re}\{Ae^{ik(ct-x)} + Be^{ik(ct+x)}\}$  is the acoustic pressure inside the tube ( $A$  and  $B$  are complex quantities). In a sinusoidal sound field the particle velocity is

$$u(x, t) = -\frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\rho c} (Ae^{ik(ct-x)} - Be^{ik(ct+x)})$$

It should be noticed that when is just a wave traveling in the  $x$  direction  $B=0$ . The volumetric velocity  $q$  is the integral of the velocity of the particles  $u$  (homogeneous and uniform) in the cross section  $S$  of the duct  $q = \int_S u dS = Su$ . If standing waves are propagating inside the duct, the acoustic impedance is the ratio between the sound pressure and the volume rate

$$Z(x) = \frac{p}{q} = Z_c \frac{Ae^{-ikx} + Be^{ikx}}{Ae^{-ikx} - Be^{ikx}}, \quad (6)$$

where  $Z_c = \rho c/S$  is the characteristic impedance of cylindrical duct. If the plane at  $x=0$  is defined as the input plane or reference, the impedance at this level can be called input impedance  $Z_e$  is

$$Z_e = \frac{p(0)}{q(0)} = Z_c \left[ \frac{A+B}{A-B} \right]. \quad (7)$$

At a distance  $x=L$  the impedance is

$$Z_L = \frac{p(L)}{q(L)} = Z_c \left[ \frac{Ae^{-ikL} + Be^{ikL}}{Ae^{-ikL} - Be^{ikL}} \right]. \quad (8)$$

The reflection coefficient at the end ( $x=0$ ) is the relationship between the amplitudes of the reflected wave between the incident

$$R = \frac{B}{A} = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c} = \frac{\bar{Z} - 1}{\bar{Z} + 1}. \quad (9)$$

If the wall is almost rigid ( $\bar{Z} \gg 1$ ) there is a phase reflection ( $R=1$ ), and if the impedance is very small ( $\bar{Z} \ll 1$ ) reflection is almost in antiphase ( $R=-1$ ).

## Experimental set-up

If the pressure waves which propagate inside the duct find a discontinuity, part of the wave energy is transmitted in the forward direction of the wave and part is reflected back. To analyze the amount of energy that is reflected in the discontinuity, the effective pressure of the incident wave is compared with the effective pressure of the reflected wave. This ratio, between the effective pressure (root mean square of the instantaneous pressure amplitude  $p(t)$ ) of the reflected wave  $P_{efRW}$  and the effective pressure of the incident wave  $P_{efIW}$  is called reflection coefficient  $R$  at the duct end

$$R = \frac{P_{efRW}}{P_{efIW}}. \quad (10)$$

The experimental set-up consists in a wave generator which sends an electric pulse which is reproduced in a high speaker that is situated in one end of the PVC cylindrical tube of length  $L_c=5\text{m}$ , inner radius  $a=0,0284\text{m}$  and thickness  $e=3.10^{-3}\text{m}$ . The sound inside the tube is captured by two microphones, this data is send to the computer were is postprocesed. Temperature and humidity are also registered. The equipment used in the experimental set-up in the scale tests is detailed at the table 1 and a scheme of the facility is shown in the figure 2. The first cutoff frequency is approximately 3500 Hz. The frequency of study has two limitations, a lower one due to the laboratory length, and a higher one due to the ability of the speaker reproduce the signal without too much distortion.

The frequency of the pressure wave that represents the rise up of the wavefront generated by a high speed train entering a tunnel is calculated from keeping the Helmholtz number ( $H=k.r$ ). Therefore the relation between the frequency at full scale and test scale is proportional to ratio between the inner radius of the tunnel and the inner radius of the duct.

The attenuation constant of the pressure waves inside the duct is evaluated and some measurements are done in order to validate the results obtained with the experimental set-up with the results published in the bibliography (Silva et al. (2009), Levine and Schwinger (1948), Baron et al. (2001)).

### Propagation constant of the plane waves inside the duct

The formula proposed by Flecher and Rossing (1991) to calculate the attenuation constant  $\alpha$  of the pressure waves inside a cylindrical pipe, where the law of exponential attenuation is assumed ( $P=P_0e^{(-\alpha x)}$ ) where  $x$  is the distance traveled by the wave, is

$$\alpha \approx \frac{w}{c_0} \left( \frac{1}{r_v \sqrt{2}} + \frac{\gamma-1}{r_t \sqrt{2}} \right), \quad (11)$$

where  $r_v$  is the dimensionless parameter that takes into account the corrections due to the viscous boundary layer and  $r_t$  is the dimensionless parameter that takes into account the corrections due to the thermal boundary layer and its expressions are

$$r_v \approx 632.8a\sqrt{f}(1-0.0029(T_0-300)), \quad (12)$$

$$r_t = r_v Pr^{1/2} = r_v \left( \frac{\eta c_p}{\kappa} \right)^{1/2} \approx 532.2a\sqrt{f}(1-0.0031(T_0-300)). \quad (13)$$

Losses due to wall vibrations of the tube have been neglected because it is rigid enough for the level of pressure that is being used.

Substituting in the above equations the conditions under which measurements have been performed ( $a=0.0284$  m,  $T_0=297$  K and  $P_0=94768$  Pa) and taking into account the corrections of the table 2 the attenuation constant obtained is  $\alpha=0.0331$ .

To evaluate experimentally the attenuation constant of the pressure wave inside the tube due to the interaction between the air inside and the walls measurements were made with microphones located in different regions of the duct, and then their positions were exchanged and re-measured.

To relate the measurements between microphones should be known the scale factor  $F_e$ , which is defined as the ratio of effective pressure measured at the microphone M2 and the effective pressure measured at the microphone M1 ( $F_e = P_{efM2}/P_{efM1}$ ). To obtain the scale factor and the attenuation constant, 3 measures were made with the microphones M1 located at 3000 and M2 at 4000 mm of the high speaker ( case a), subsequently the position of microphones was exchanged and performed other 3 measures ( case b). Dividing in both cases the pressure at the microphone M2 between the pressure at the microphone M1 and dividing them, the attenuation coefficient  $\alpha$  can be calculated

$$\frac{\left. \frac{P_{M2}}{P_{M1}} \right|_a}{\left. \frac{P_{M2}}{P_{M1}} \right|_b} = e^{(-2\alpha x)}, \quad (14)$$

as well as the scale factor  $F_e$

$$\frac{\left. \frac{P_{M2}}{P_{M1}} \right|_a}{\left. \frac{P_{M2}}{P_{M1}} \right|_b} = F_e^2. \quad (15)$$

The results of measurements made at different distances between the microphones ( $s = |x_{M2} - x_{M1}|$ ) are shown in the table 3.

It is convenient to note that the attenuation constant is proportional to the square of frequency, and the error in its calculation can lead to errors in the reflection coefficient of about 2% for large distances (3 m). To avoid such errors the method of the two microphones and four calibrations (TMFC) Hendrie (2007) could be used, where it is not necessary to determine the propagation constant.

## Validation of the experimental setup with referenced cases

### Flanged and unflanged duct

The results for the reflection coefficient at the end of a cylindrical duct for the cases of flanged and unflanged terminations which are shown in the figure 3, were obtained by using a burst of 3 cycles and frequencies between 700 and 1500 Hz. In this figure they are compared with the values obtained with the formulas proposed in the literature (Silva et al. (2009); Levine and Schwinger (1948)). From them it follows that the measurements are acceptable and that the facility is appropriate. The flange at the end of the duct decreased significantly the intensity of the reflected wave into the tube (approximately 9%) at this frequency.

### Chimneys as pressure reliefs

In order to validate the experimental setup have been also tested the pressure that is transmitted through a chimney of different cross section area  $S_h$  and the pressure reflected to the tube of cross section area  $S_c$ . The length of the chimney has been chosen in order to be able to distinguish the incident and the reflected waves in the time domain signals recorded in the microphones. The pressure transmitted through the chimney has been evaluated with the ratio between the effective pressure wave transmitted through the chimney,  $p_{efOTH}$  and the effective pressure of the incident wave at the junction between tube and the chimney,  $p_{efOI}$  ( $r_{ITH} = p_{efOTH}/p_{efOI}$ ).

Transmission coefficients obtained in the chimney tests, multiplied by the cross sectional area are compared with those provided by the literature (Baron et al. (2001)) in the figure 4, in which it can be seen that the accuracy of the experimental set up is acceptable.

## Results

Due to the porosity of the nozzle the incident wave is partially reflected at each hole creating a new wave that sums in antiphase with the incident and rest of the reflected waves in the other holes, with a time delay proportional to the distance between the holes.

Reflection coefficient has been measured varying the number of open holes in the porous nozzle, closing one by one the hole starting from the furthest from the exit (also the smallest). The results shown in the table 4 indicate that the number of holes has a strong influence in the intensity of the reflected wave which varies from 60% when they are all open to 80% when they are all closed. The fact that closing the last hole slightly decreases the ratio of reflected wave may be due to interference between the hole and the opening of the exit, because the waves generated in both discontinuities do not behave as a plane wave.

Open holes through the surface are a high pass filter that reflects the waves and transmits low-frequency waves whose frequency is above the cutoff frequency of the hole that following Flecher and Rossing (1991) is  $f_c = 0.011c \left(\frac{b}{a}\right) \sqrt{\frac{l}{sl}}$ . Where  $t$  is the thickness of the tube,  $l$  is the effective acoustic length of the hole and  $2s$  is the distance between holes. In the porous side wall the frequencies of the holes starting with the smallest would be 305, 408, 447, 466, 485 and 505 Hz, all the holes reflect and transmit the incident wave. In contrast, if the holes are closed up a low pass filter for waves that propagate along the duct.

To study the effect of porosity on the duct wall (size and distance between holes) regardless of the energy radiated in the exit duct, a duct section has been perforated and located between two lines long enough to avoid reflections at the end, and has evaluated the energy reflected and transmitted in this section. The porous section has 60 holes of diameter 12 mm, distributed in 3 rows of 10 (separated 20mm) on each side of the plane of symmetry.

The influence of the porosity  $\sigma$ , has been analyzed by varying the number of holes  $\sigma = 0, 3, 7, 15 \%$  for a 3 cycles sinusoidal burst frequency of 1000 Hz and the energy reflected with the porous section is compared with the case in which the inside of the duct is completely smooth. The reflection coefficient obtained through the porous tube is defined as

$$T[\text{dB}] = 20 \log \left( \frac{\left| \frac{p_{it}}{p_{i\sigma}} \right|}{\left| \frac{p_{it}}{p_i} \right|} \right). \quad (16)$$

The results obtained which are shown in the table 5; indicate that the wave is practically reflected back as an open end termination when the porosity is large

## Conclusions

This study indicates that experimental set-up is adequate to evaluate the reflection coefficient at a duct end, the pressure transmitted through a chimney, and the transmission coefficient in a porous section.

The porous nozzle is an efficient system to decrease the coefficient of reflection of pressure waves that reach the outlet of the cylindrical duct. The porosity may increase by 20 % the efficiency of the bevel tip in reducing the intensity of the reflected wave and generate a more dispersed wave, which reduces the intensity of the transmitted wave outside. Also the chimney is an efficient method to reduce the pressure inside the duct, and optimizing the length in relation to the signal shape could decrease even more the pressure gradient and reduce the micro-pressure waves. The flange at the end of the duct can duplicate at high frequencies the power radiated out of the tube.

## Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the support of Ineco.

## References

- [1] Atig, M., Dalmont, J., & Gilbert, J. (2004). Termination impedance of open-ended cylindrical tubes at high sound pressure level. *Comptes Rendus Mecanique*, 332:299–304.
- [2] Baron, A., Mossi, M., & Sibilla, S. (2001). The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(5):365–40.
- [3] Bellenoue, M., Morinière, V., & Kageyama, T. (2002). Experimental 3-d simulation of the compression wave, due to train-tunnel entry. *Journal of Fluids and Structures*, 16(5):581 – 595.
- [4] Bourquin, V., Gillieron, C., & Monkewitz, P. (2002). Experimental analysis of the propagation of pressure waves in tubes. *TRANSAERO: A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimization*, 79.



- [6] Dalmont, J., Nederveen, C., & Joly, N. (2001) Radiation impedance of tubes with different flanges: numerical and experimental investigations. *Journal of Sound and Vibration*, 244(3): 505–534.
- [7] EN14067-5:2006:E, . Railway applications - Aerodynamics - Part 5: Requirements and test procedures for aerodynamics in tunnel.
- [8] Flecher, N. & Rossing, T. (1991). *Physics of musical instruments*. Springer-Verlag New York.
- [9] Fujii, K. & Ogawa, T. (1995). Aerodynamics of high speed trains passing by each other. *Computers & Fluids*, 24(8):897 – 908.
- [10] Fukuda, T., Ozawa, S., Iida, M., Takasaki, T., & Wakabayashi, Y. (2006) Distortion of compression wave propagating through very long tunnel with slab tracks. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 49(4):1156–1164.
- [11] Grégorie, R., Réty, J., Kageyama, T., Bellenoue, M., & Morinière, V. (1997). Experimental study (scale 1/70) and numerical simulations of the generation of pressure waves and micro-pressure waves due to high-speed train-tunnel entry. *Proceedings of the 9th International Symposium on*
- [12] *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pages 877–903.
- [13] Hara, T. (1961). Aerodynamic force acting on a high speed train at tunnel entrance. *The Japan Society of Mechanical Engineers*.
- [14] Hong Liu, T., Qi Tian, H., & Feng Liang, X. (2010). Design and optimization of tunnel hoods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(3):212 – 219.
- [15] Howe, M.S. (1997a). The compression wave produced by a high-speed train entering a tunnel. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1974):1523–1534.
- [16] Howe, M.S. (1999a). Prolongation of the rise time of the compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical,*
- [17] *Physical and Engineering Sciences*, 455(1983):863–878.
- [18] Howe, M.S. (1999b). On Rayleigh's computation of the "end correction", with application to the compression wave generated by a train entering a tunnel. *Journal of Fluid Mechanics*, 385:63–78, April.
- [19] Howe, M.S. (2003b). Design of a tunnel-entrance hood with multiple windows and variable cross-section. *Journal of Fluids and Structures*, 17(8):1111 – 1121.
- [20] Howe, M.S., Iida, M., Fukuda, T., & Maeda, T. (2000). Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal. *Journal of Fluid Mechanics*, 46:111–132.
- [21] Howe, M.S., Iida, M., & Fukuda, T. (2003a). Influence of an unvented tunnel entrance hood on the compression wave generated by a high-speed train. *Journal of Fluids and Structures*, 17:833–853.
- [22] Howe, M. (1997b). Mach number dependence on the compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel. *Journal of Sound and Vibration*, 46:147–163.
- [23] Howe, M. (1998). The compression wave generated by a high-speed train at a vented tunnel entrance. *Acoustical Society of America*.
- [24] Howe, M. (2003c). On the infrasound generated when a train enters a tunnel. *Journal of Fluids and Structures*, 17(5):629 – 642.

- [25] Howe, M. (2007). The genetically optimized tunnel-entrance hood. *Journal of Fluids and Structures*, 23 (8):1231 – 1250.
- [26] Howe, M. & Cox, E. (2005). Reflection and transmission of a compression wave at a tunnel portal. *Journal of Fluids and Structures*, 20(8):1043 – 1056.
- [27] Howe, M., Iida, M., Maeda, T., & Sakuma, Y. (2006). Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood. *Journal of Sound and Vibration*.
- [28] Hwang, J. & Lee, D.H. (2000) Unsteady aerodynamic loads on high speed trains passing by each other. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 14:867–878.
- [29] Hwang, J., Yoon, T.S., ho Lee, D., & gab Lee, S. (2001) Numerical study of unsteady flowfield around high speed trains passing by each other. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 44(3):451–464.
- [30] Iida, M., Kikuchi, K., & Fukuda, T. (2006). Analysis and experiment of compression wave generated by train entering tunnel entrance hood. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 49(3):761–770.
- [31] Kaoua, J.N., Pope, C.W., Henson, D.A., & Mott MacDonald Ltd, UK, . (2006). A parametric study into the factors affecting the development and alleviation of micro-pressure waves in railway tunnels. 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels.
- [32] Keefe, D. (1984). Acoustical wave propagation in cylindrical ducts transmission line parameter approximations for isothermal and nonisothermal boundary conditions. *Acoustical Society of America Journal*, 75:58–62.
- [33] Kikuchi, K., Ozawa, S., Takami, H., & Iida, M. (2009). Continuous pressure wave generated by a train running in a tunnel. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*.
- [34] Kim, H., Lee, D., Kashimura, H., & Setoguchi, T. (2003). Propagation characteristics of compression waves reflected from the open end of a duct. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 17:718–72.
- [35] Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A., & Sanders, J. (2000). *Fundamentals of Acoustics*. Wiley.
- [36] Lefebvre, A., Scavone, G.P., Abel, J., & Buckiewicz-Smith, A. (2007). A comparison of impedance measurements using one and two microphones. *ISMA*.
- [37] Levine, H. & Schwinger, J. (1948). On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Phys. Rev.*, 73(4):383–406.
- [38] Liu, J.h.i.a..c.h.u.n. & Lu, P.C. (2009). Sound field prediction in long enclosures with branches: A combined method. *Applied Acoustics*.
- [39] Maeda, T., Matsumura, T., Iida, M., Nakatani, K., & Uchida, K. (1993). Effect of shape of train nose on compression wave generated by a train entering tunnel. *The Japan Society of Mechanical Engineers*.
- [40] Murray, P. & Howe, M. (2010). Influence of hood geometry on the compression wave generated by a high-speed train. *Journal of Sound and Vibration*, 329(14):2915 – 2927.
- [41] Nishimura, M. & Ikeda, K. (2008). Reduction of sound reflection coefficient at open duct end by using porous side wall. *Journal of Environment and Engineering*, 3(2):351–362.
- [42] Norris, A.N. & Sheng, I.C. (1989). Acoustic radiation from a circular pipe with an infinite flange. *Journal of Sound Vibration*, 135:85–93.

- [44] Raghunathan, R.S., Kim, H.D., & Setoguchi, T. (2002). Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(6-7):469 – 514.
- [45] Ricco, P., Baron, A., & Molteni, P. (2007). Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- [46] Sato, T. & Sassa, T. (2005). Prediction of the compression pressure wave generated by a high-speed train entering a tunnel. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 19:53–59.
- [47] Selamet, A., Ji, Z.L., & Kach, R.A. (2001). Wave reflections from duct terminations. *Acoustical Society of America Journal*, 109:1304–1311.
- [48] Silva, F., Guillemain, P., Kergomard, J., Mallaroni, B., & Norris, A.N. (2009) Approximation formulae for the acoustic radiation impedance of a cylindrical pipe. *Journal of Sound and Vibration*.
- [49] Sugimoto, N. & Ogawa, T. (1997). Acoustic analysis of the pressure field in a tunnel, generated by entry of a train. *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- [50] Vardy, A.E. & Reinke, P. (1999). Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 213.
- [51] Vardy, A. (2008). Generation and alleviation of sonic booms from rail tunnels. *Proceedings of The Ice-Engineering and Computational Mechanics*, 161:107–119.
- [52] William-Louis, M. & Tournier, C. (2005). A wave signature based method for the prediction of pressure transients in railway tunnels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- [53] William-Louis, M. & Tournier, C. (1998). Non-homentropic flow generated by trains in tunnels with side branches. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*.
- [54] Yoon, T. & Lee, S. (2001). Efficient prediction methods for the micro-pressure wave from a high-speed train entering a tunnel using the kirchhoff formulation. *Journal of the Acoustical Society of America* 110(5):2379–2389.
- [55] Zeng, S.m. & Gretler, W. (1995). Pressure wave propagation in a short tunnel caused by passing trains. *Forschung im Ingenieurwesen*.
- [56] Hendrie D. A. (2007). Development of Bore Reconstruction Techniques Applied to the Study of Brass Wind Instruments.

Appendix A.

A.1. Figures

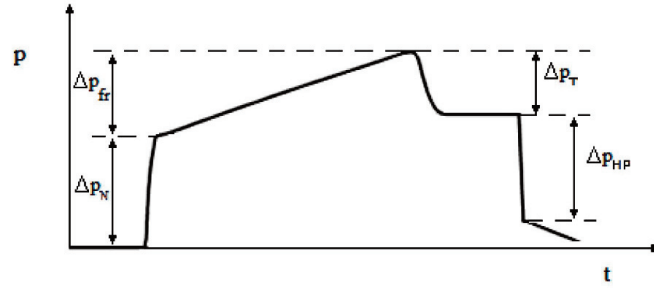


Fig. 1. Train reference signature defined by the standard UNE-EN 14067-5:2006

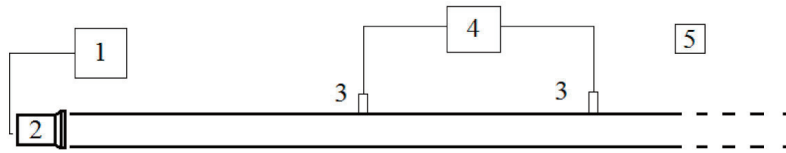


Fig. 2. Scheme of the facility components: wave's generator (1), high speaker (2), microphones (3), computer (4) and temperature and humidity sensor (5)

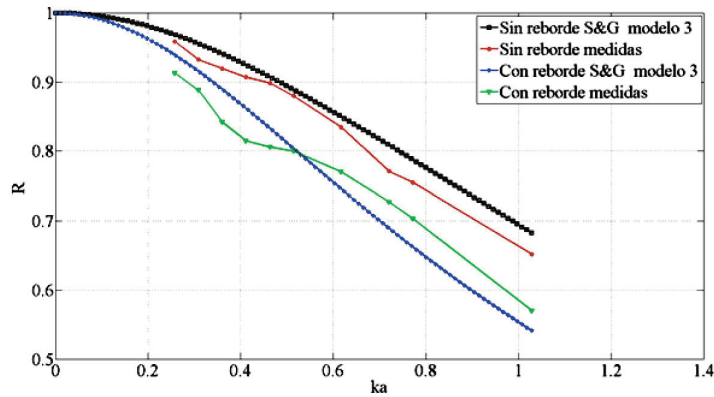


Fig. 3. Comparison of experiment results for the reflection coefficient  $R$  of a flanged and an unflanged duct with model 3 from Silva et al. (2009)

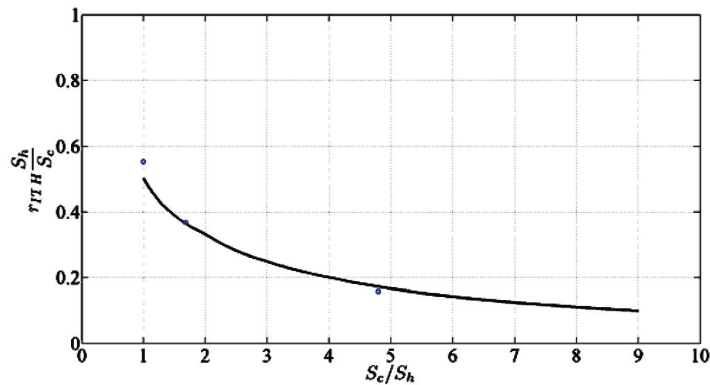


Fig. 4. Variation with the area ratio  $S_c/S_h$  of effective pressure transmitted by the chimney and the incident  $r_{ITH}$  multiplied by the inverse of the area ratio. Continuous line: results of Baron et al. (2001), circles: measurements.

A.2. Tables

Equipment	Model
Waves generator (1)	HP 33120A
High speaker (2)	ALTEC lansing
Microphones (3)	Sitecom TC-221
Computer (4)	HP Pavilion dv6
Temperature and humidity sensor (5)	RS 212-124

Table 1. Equipment used in the scale tests

Variable	Temperature correction
$\rho$	$1.1769 \cdot 10^{-4} (1 - 0.00335 (T_0 - 300))$
$\gamma$	$1.4017 (1 - 0.0025 (T_0 - 300))$
$\eta$	$1.846 \cdot 10^{-5} (1 - 0.00335 (T_0 - 300))$
$Pr^{1/2}$	$0.8410 (1 - 0.0002 (T_0 - 300))$
$c_0$	$347.23 (1 - 0.00166 (T_0 - 300))$

Table 2. Temperature corrections in the air properties

$s [m]$	$Fe$	$\alpha$
1	$1.0557 \pm 0.0033$	$-0.0344 \pm 0.0013$
2	$1.0776 \pm 0.0014$	$-0.0300 \pm 0.0012$
2.5	$1.0781 \pm 0.0256$	$-0.0313 \pm 0.0019$

Table 3. Scale factor,  $Fe$ , attenuation coefficient,  $\alpha$ , inside the PVC tube for different distances between the microphones  $s$ .

$N$	$\sigma [\%]$	$\alpha$
6	15.4	$0.611 \pm 0.002$
5	15.0	$0.613 \pm 0.001$
4	14.1	$0.810 \pm 0.002$
3	13.1	$0.635 \pm 0.001$
2	12.1	$0.706 \pm 0.001$
1	10.9	$0.780 \pm 0.001$
0	9.6	$0.800 \pm 0.002$

Table 4. Variation of the reflection coefficient  $R$  at the porous nozzle with the number of open vents  $N$ .

$\sigma$ [%]	$TL$ [dB]
0	-0.36 $\pm$ 0.05
3	-10.39 $\pm$ 0.05
7	-17.13 $\pm$ 0.05
15	-20.48 $\pm$ 0.05

Table. 5. Transmission coefficient in the porous section

# Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes

## *Study about uses of train regenerated energy*

Diego López Durán\*

*Organización Industrial, ICAI, Universidad Pontificia de Comillas, Madrid, 28015, España*

---

### Resumen

Los trenes de tracción eléctrica son capaces de comportarse como generadores durante el proceso de frenado, transformando parte de la energía cinética y potencial que poseen en energía eléctrica.

Una vez que se genera, esta energía puede emplearse para alimentar los servicios auxiliares del propio tren, así como para abastecer a elementos del sistema ferroviario como otros trenes, balizas, semáforos o talleres. También podría ser acumulada de manera puntual e incluso ser devuelta a la red pública.

Ahora bien, desde el punto de vista económico, sería de gran utilidad determinar el ahorro energético que supondría la inclusión de esta tecnología, para poder establecer una comparativa e identificar en cada caso concreto si resulta conveniente realizar las inversiones necesarias.

Palabras clave: Frenado regenerativo, aprovechamiento energético.

### Abstract

*Electric train traction units can behave as generators during brake, transforming part of the kinetic and potential energy into electrical energy.*

*Once generated, this energy could be used for auxiliary services supplying or other elements of the rail system such as trains, beacons, traffic lights or repair shops. It could be also accumulated during a short period of time or even be returned to the public main.*

*Furthermore, from the economical point of view, it would be useful to determine the energy savings that would suppose the inclusion of this technology, in order to establish a comparison and identify in each case whether it is advisable to make the necessary investments.*

*Keywords: Regenerative breaking, energy efficiency.*

---

## 1. Objeto

El presente artículo tiene como objetivo estudiar y analizar el proceso de recuperación de energía durante el frenado de los trenes, así como sus posibles usos en el instante en el que se obtiene, valorando la influencia de los principales factores que afectan a la optimización del flujo energético de los sistemas ferroviarios.

## 2. Antecedentes

Actualmente, se están empleando gran cantidad de recursos para evaluar y mejorar la eficiencia de los medios de transporte, puesto que dicha actividad se traduce en una reducción de consumo energético y de emisiones.

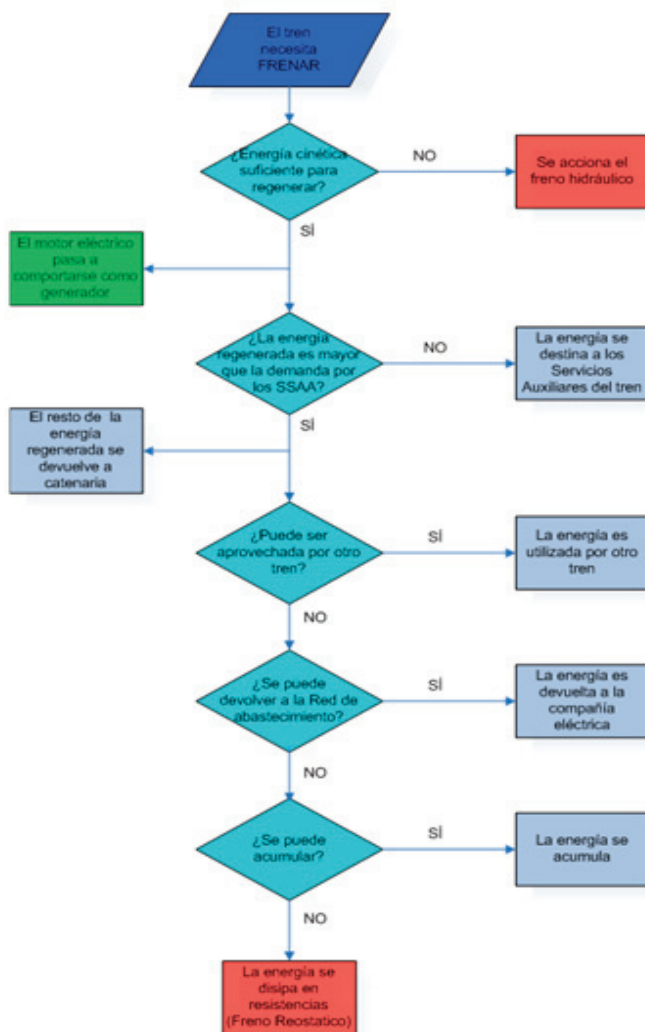
A día de hoy, una de las prácticas que está obteniendo muy buenos resultados es la de incorporar en el vehículo un sistema capaz de recuperar parte de la energía que se desaprovecha durante los procesos de frenado, a través de un motor eléctrico que transforme la energía eléctrica en mecánica y viceversa.

Ahora bien, ¿Qué hacemos con esa energía una vez que se ha generado?

En el caso de los trenes eléctricos, el hecho de que estén conectados mediante el pantógrafo a una catenaria y por ende a una red de energía eléctrica, permite diversas soluciones a la hora de abordar éste problema, ya que parte de la energía generada puede ser almacenada a bordo del tren, en un banco de supercondensadores o baterías, también puede emplearse para alimentar a otros elementos del sistema ferroviario (otros trenes, balizas, semáforos, etc.) e incluso podría ser devuelta a la red de abastecimiento para ser aprovechada por otros consumidores. En cualquier caso, en términos de eficiencia energética, la implantación de equipos de recuperación y aprovechamiento se traduce en una menor consumo amén de otros efectos positivos como una posible reducción de la potencia instalada en las subestaciones de tracción y aumentos puntuales de los niveles de tensión en catenaria.

### 3. El frenado regenerativo y sus posibilidades

#### 3.1. Funcionamiento



Los frenos regenerativos se basan en el principio de que un motor eléctrico puede ser utilizado como generador. Si el motor eléctrico de tracción es reconectado como generador durante el frenado, los terminales de alimentación se convierten en suministradores de energía, la cual se conduce hacia una carga eléctrica, y es esta carga la que produce el efecto de frenado.

En función del destino de la energía generada podemos clasificar éste tipo de freno como regenerativo (la energía se aprovecha) o reostático (la energía eléctrica generada en la frenada es disipada en forma de calor). El freno tradicional, basado en la fricción, se sigue empleando junto con el freno eléctrico, ya que aunque este último reduce de manera efectiva la velocidad a niveles bajos, la cantidad de energía a disipar queda limitada por la capacidad de absorción de ésta por parte del sistema, o por el estado de carga de los acumuladores. Un efecto no regenerativo puede ocurrir si otro vehículo o receptor conectado a la red suministradora de energía no la consume o si las baterías o condensadores están cargados completamente. Por esta razón, actualmente es necesario contar con un freno reostático que absorba el exceso de energía en dichas situaciones. Hay que tener en cuenta el inconveniente adicional de que el

Fig. 1. Diagrama de Flujos del proceso de Frenado Regenerativo. Fuente: Elaboración propia



calor generado por los resistores generalmente ha de ser expulsado al exterior, lo que se traduce en un gasto energético añadido. Por tanto, la utilización del frenado reostático ha reducirse al mínimo indispensable. En el flujograma que aparece a la izquierda se indican los condicionantes lógicos que se tienen en cuenta a la hora de distribuir la energía durante el proceso de frenado.

Generalmente es más apropiado devolver a catenaria la energía regenerada que almacenarla, ya que el rendimiento asociado a los distintos procesos que se derivan de la acumulación de energía suele ser inferior a las pérdidas en catenaria.

### 3.2. Devolución de la energía a la Red. Subestaciones reversibles

A la hora de devolver la energía regenerada a la Red de alimentación a la que están conectadas las subestaciones, es necesario contar con la infraestructura adecuada:

1.- Para registrar y cuantificar la energía devuelta a la red, es necesario incorporar sistemas de medida específicos.

2.- Es recomendable disponer también de elementos que puedan proporcionar una alternativa en caso de la compañía eléctrica suministradora no pueda asumir la recepción de esa energía, tales como acumuladores, baterías o reostatos.

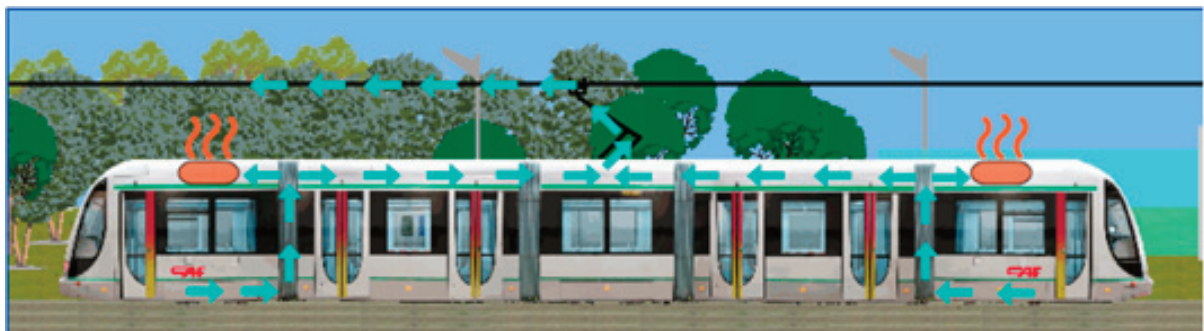


Fig.2. Representación del flujo de la energía al ser devuelta a catenaria. Fuente: CAF

3.- Para que sea técnicamente posible devolver la energía a la Red, en algunos casos será necesario instalar equipos específicos destinados a ese fin.

En función del sistema de electrificación, hemos de distinguir entre:

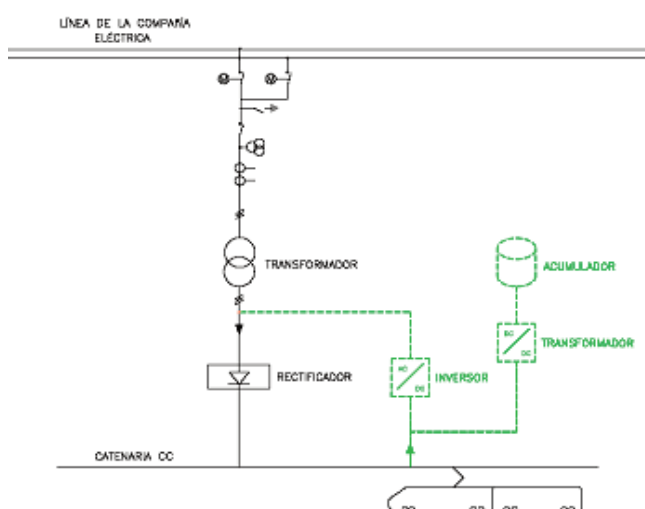


Fig. 3. Esquema Subestación de Corriente Continua con Inversor. Fuente: Elaboración propia

#### Subestaciones de corriente continua

Una de las diferencias fundamentales con respecto a las subestaciones de corriente alterna es el puente de diodos **rectificador** situado tras el transformador de potencia. Se encarga de realizar el paso de corriente alterna proveniente de la red a corriente continua con la que se alimenta a la catenaria. Éste dispositivo sólo admite la circulación de corriente en sentido aguas abajo. Por consiguiente, para que las subestaciones de corriente continua sean reversibles es necesario instalar equipos de inversores de cuatro cuadrantes, cuyo dimensionamiento estará relacionado con el volumen de energía que esté previsto recuperar.

En la figura aparece representado en color negro el esquema eléctrico de una subestación de corriente continua no reversible, y en color verde la instalación de equipos necesaria para que la subestación pueda devolver parte de la energía regenerada a la Red de abastecimiento.

El inversor de cuatro cuadrantes se encarga de “inyectar” corriente alterna en el lado de baja del transformador de potencia, a partir de la energía en corriente continua procedente del tren. Como comentábamos anteriormente, en caso de que no resulte interesante o posible la devolución de la energía regenerada a la red, sería conveniente disponer, además, de un sistema de acumulación para dotar al sistema de cierto margen de maniobra.

#### Subestaciones de corriente alterna

No existe ningún impedimento para que se produzca la devolución a la red a través de subestaciones de corriente alterna. Se podría decir que este tipo de subestaciones son de por sí reversibles. En la mayoría de líneas de Alta Velocidad españolas, actualmente ya se está devolviendo energía a la red.

El ahorro energético anual para los sistemas de electrificación en corriente alterna se encuentra entre un 5 y un 20 % en función de las características de la línea.

## 4. Estudio comparativo. Método de cálculo y simulaciones realizadas

### 4.1. Introducción

El único método para poder comparar consumos energéticos de los sistemas ferroviarios, aparte de la medición empírica en campo, es la realización de simulaciones. Para ello, se emplea un programa informático en el que se modela la línea y que resuelve el circuito eléctrico, aportando los datos de la potencia consumida y demandada por los trenes a cada instante.

### 4.2. Resumen de resultados

Para poder comparar el consumo energético de un sistema sin recuperación de energía frente a otro con recuperación, se han realizado diversas simulaciones.

A continuación se describen los resultados obtenidos para los 7 escenarios simulados:

Tabla. 1. Resultados

Escenarios simulados							
	Esc.1	Esc.2	Esc.3	Esc.4	Esc.5	Esc. 6	Esc. 7
Energía consumida* (kWh)	2785	4942	3210	3667	3211	3632	47022
Energía regenerada* (kWh)	1194	2381	1364	1429	1367	1686	3226
Porcentaje respecto a energía consumida (%)	32,15	36,14	31,86	29,22	31,93	34,82	6,86

\*Medida en pantógrafo

Las principales características de cada uno de los escenarios se describen en el apéndice A.

## 5. Conclusiones

Se hace necesario continuar trabajando en esta línea, realizando más simulaciones con el objetivo de identificar cuáles son los principales factores que afectan a la capacidad de regeneración de una línea de ferrocarril y de qué manera influyen. Esto nos permitiría, por ejemplo, establecer un criterio de Pareto con el que podamos, sin necesidad de hacer ningún cálculo, tener una idea aproximada de las posibilidades o capacidad de recuperación energética que ofrece cada línea concreta de ferrocarril.

## Referencias

[1] García Álvarez, A. (2008) “Inventario de consumos de energía del ferrocarril en España” 1 versión, octubre de 2008 en “Notas Técnicas ElecRail”, nº4. Ed.: FFE. Revista Vía Libre. Nº 532.

[2] García Álvarez, A. (2010) Dinámica de los trenes en alta velocidad. 6º Edición. ISBN: 978-84-89649-62-0. Depósito legal: M-3214-2010. [http://www.ffe.es/dep/PDF/dinamica\\_trenes\\_AV.pdf](http://www.ffe.es/dep/PDF/dinamica_trenes_AV.pdf)

[3] LEY 39/2003, (2005) de 17 de noviembre, del Sector Ferroviario. BOE núm. 276. [http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/FERROCARRILES/\\_INFORMACION/NORMATIVA/](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/FERROCARRILES/_INFORMACION/NORMATIVA/)

[4] Ministerio de Fomento (2005). Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT). <http://peit.cedex.es/>

[5] Real Decreto 1955/2000 (2000) de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. [http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/rd1955-2000.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/rd1955-2000.html)

[6] Real Decreto 1011/2009, (2009) de 19 de junio, por el que se regula la Oficina de Cambios de Suministrador. [http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/rd1011-2009.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/rd1011-2009.html)

[7] Arenillas Melendo, J. (2006) “Apuntes del Máster en sistemas ferroviarios. Módulo de material rodante. El Freno Eléctrico”. Instituto de Postgrado y Formación Continua. Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

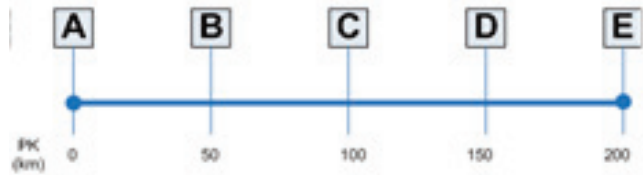
## Apéndice A. Principales características de los escenarios simulados

### A.1. Escenario 1

Número de paradas: 5, equidistantes.

Longitud del tramo: 200 km

Perfil geométrico:

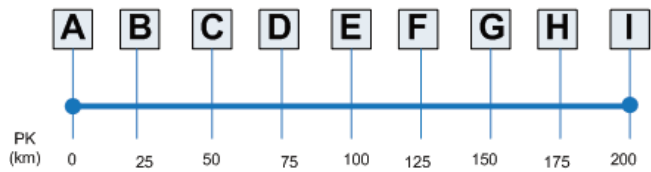


### A.2. Escenario 2

Número de paradas: 10, equidistantes.

Longitud del tramo: 200 km

Perfil geométrico:

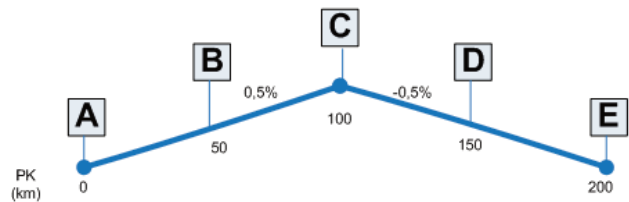


### A.3. Escenario 3

Número de paradas: 5, equidistantes.

Longitud del tramo: 200 km

Perfil geométrico:

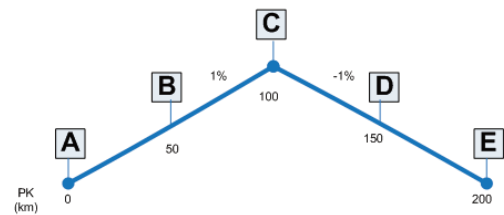


### A.4. Escenario 4

Número de paradas: 5, equidistantes.

Longitud del tramo: 200 km

Perfil geométrico:

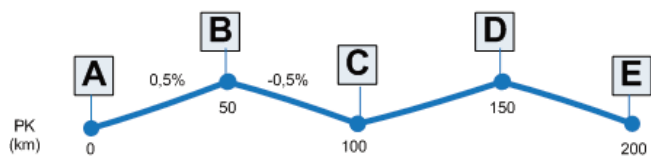


### A.5. Escenario 5

Número de paradas: 5, equidistantes.

Longitud del tramo: 200 km

Perfil geométrico:

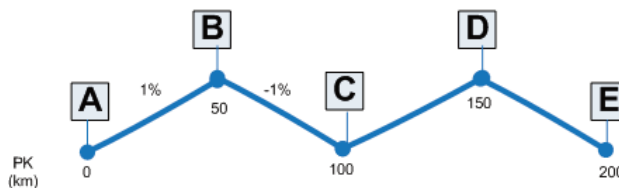


A.6. Escenario 6

Número de paradas: 5, equidistantes.

Longitud del tramo: 200 km

Perfil geométrico:

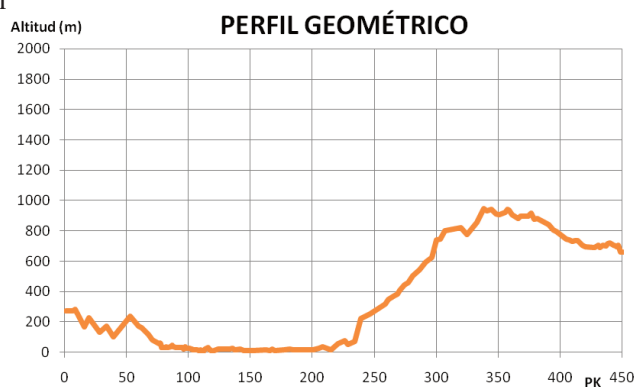


A.7. Escenario 7

Número de paradas: 5, situadas según se indica en el esquema a continuación.

Longitud del tramo: 450 km

Perfil geométrico:



En esta última simulación, tanto el nivel de tráfico como la potencia de las unidades móviles es superior al del resto.



# Estrategia para el mantenimiento de una L.A.V durante 20 años

## *High speed line maintenance strategy for 20 years*

Inés Álvarez Amandi\*

Universidad Pontificia Comillas, Gijón 33201, España

### Resumen

La crisis económica vivida en estos años obliga al sector industrial y en particular al ferroviario, a la implantación de nuevas estrategias de inversión que le permitan resistir tanto la paralización de la inversión tecnológica, como en infraestructuras y desarrollo. Esto en el sector ferroviario español se va a hacer mediante Financiación Pública – Privada (PPP). La gestión de los proyectos tendrá un enfoque totalmente distinto, con la exigencia de nuevos requisitos de fiabilidad y mantenimiento, por lo que los proyectos deberán ser concebidos desde la fase de diseño con nuevas estrategias. Las nuevas líneas de Alta Velocidad (L.A.V) en España van a llevar asociado al proyecto de ejecución un contrato de mantenimiento por un periodo de veinte años.

Palabras clave: mantenimiento, fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, seguridad, ciclo de vida útil, renovación, reposición, obsolescencia, coste del ciclo de vida (LCC)

### Abstract

*The economic crisis in these years requires of the industrial sector and in particular the rail, the introduction of new investment strategies enable them to resist both technological stagnation of investment, as in infrastructure and development. The solution in the Spanish railway sector will be Public - Private Financing (PPP). The project management will have a totally different approach, with the demands of new requirements for reliability and maintenance, so these projects must be conceived with new strategies from the design. The new high speed lines (HSL) in Spain will be associated, with the project, a maintenance contract for twenty years.*

*Keywords: maintenance, reliability, availability, maintainability, safety, life cycle, updating, replacement, obsolescence, life cycle cost*

## 1. Justificación del proyecto

En la situación actual respecto a los nuevos proyectos de líneas de Alta velocidad (A.V.) en España lo más destacable son las nuevas modalidades de financiación de los mismos.

Ante los recortes presupuestarios, los técnicos unifican esfuerzos con objeto de sacar el máximo rendimiento a la tecnología al menor coste posible; no abandonan el desarrollo ni la implementación de los diseños pero lo enfocan desde la perspectiva económica pues es el aspecto más restrictivo en el momento actual.

El proyecto “Estrategia para el mantenimiento de una L.A.V. durante 20 años” surge como consecuencia de la nueva situación por la que está atravesando el sector ferroviario español derivada de la crisis económica.

Ante la paralización de la inversión tecnológica, los nuevos proyectos de A.V. se van a realizar con un nuevo modelo de financiación, denominado P.P.P. (Participación Público Privada).

La A.V. española va a llevar asociado al proyecto de señalización un contrato de mantenimiento por un periodo de veinte a veinticinco años.

Para el cumplimiento de dicho contrato será necesario satisfacer los índices RAMS (fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad) a los cuales van asociados los pagos. Para ello es preciso hacer un estudio en profundidad de todos los materiales que van a ser necesarios durante los 25 años de operación, tanto para la reposición de los averiados como para la sustitución de los obsoletos, en función del avance tecnológico que sufran los distintos equipos y sistemas instalados.

Por todo ello se hace imprescindible la realización de un estudio del ciclo de vida útil para cada uno de los elementos a instalar, de forma que nos ayude a programar la sustitución de elementos por obsolescencia a lo largo del periodo de mantenimiento y siempre antes de que comience el periodo de decadencia, de manera que no se vea afectado el servicio, o que la incidencia, en caso de que exista sea la mínima posible. Además, el ciclo de vida útil, nos dará información sobre el stock de materiales necesario para la renovación de los elementos y equipos en servicio en el instante óptimo para la instalación.

El mantenimiento engloba todo el conjunto de operaciones preventivas, correctivas y predictivas, así como las actividades necesarias para que los sistemas, las instalaciones, los edificios y todos los elementos auxiliares se encuentren en perfectas condiciones con dos objetivos fundamentales: asegurar, y si es posible prolongar la vida útil de los mismos, y garantizar su correcto funcionamiento y con los índices de fiabilidad, disponibilidad y calidad definidos en el pliego de condiciones particulares de los proyectos.

Garantizar un servicio de alta seguridad y calidad a los usuarios es el fin primordial de los responsables de instalación y mantenimiento de la empresa adjudicataria del proyecto.

El alcance de un contrato de mantenimiento varía de acuerdo a las condiciones descritas en el pliego de la Contratación Público-Privada. Habitualmente las instalaciones objeto de mantenimiento son las siguientes:

- Subsistema de Señalización.
- Subsistema de Telecomunicaciones Fijas, Protección Civil y Seguridad.
- Subsistema de Telecomunicaciones Móviles.
- Sistemas Auxiliares de Detección.
- Videovigilancia, control de accesos y anti-intrusión.
- Interfaces.

## **2. Estudio RAMS para el mantenimiento**

Para gestionar la confiabilidad de un proyecto ferroviario se realizan estudios/programas RAMS, de manera que la empresa encargada del mantenimiento de la instalación pueda garantizar y documentar, durante el ciclo de vida del sistema y sus componentes, el cumplimiento de los requisitos de fiabilidad (Reliability), disponibilidad (Availability) y mantenibilidad (Maintainability) especificados en las normas EN50126, EN50128 y EN50129.

- Fiabilidad: "La probabilidad de que un elemento pueda realizar una función requerida en condiciones determinadas durante un intervalo de tiempo determinado ( $t_1$ ,  $t_2$ )".

- Disponibilidad: "La capacidad que tienen un producto de hallarse en situación de realizar una función requerida en condiciones determinadas en un momento dado o durante un intervalo de tiempo señalado, suponiendo que se faciliten los recursos externos requeridos".

- Mantenibilidad: "La probabilidad de que una acción dada de mantenimiento activo correspondiente a un elemento en unas condiciones de utilización dadas, pueda ser llevada a cabo en un intervalo establecido de tiempo cuando el mantenimiento se realiza en condiciones establecidas y se utilizan procedimientos y recursos establecidos".



- Seguridad: "Ausencia de riesgo inaceptable de daño".

### *2.1. Filosofía del programa RAMS*

El uso del programa RAMS se centra en la fase de definición del proyecto para la planificación específica de las actividades RAMS a lo largo del mismo con el objeto de optimizar los beneficios recibidos por el cliente.

Las características de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad se logran teniendo en cuenta tanto los aspectos económicos como los técnicos.

Las medidas de seguridad técnica y las correspondientes actividades de verificación y validación, así como los procesos empresariales y la cultura de empresa, desempeñan, pues, una función importante en la formación de la característica del producto que llamamos "Seguridad". La seguridad de los productos se demuestra en el Dossier de Seguridad, que contiene:

- un informe de Gestión de la Calidad según ISO 9011.
- un informe de Gestión de Seguridad.
- un informe de Seguridad Técnica según EN50129.

### *2.2. Ciclo de vida del proceso RAMS*

Para cada una de las actividades del ciclo de vida del sistema se definen responsabilidades, hitos (paralelos al plan de proyecto) y referencias a las tareas subyacentes que deban realizarse en el proyecto en relación a las cuestiones RAMS, siguiendo la estructura definida en EN50126.

El ciclo de vida de RAMS y las actividades de control están completamente integrados en el ciclo de vida del proceso de ingeniería.

La planificación de RAMS es la actividad inicial. Tras el nombramiento del Responsable de RAMS, se define un Plan de Seguridad y un Programa RAM. Normalmente, estos documentos son aprobados y suscritos por el cliente y la autoridad de seguridad ferroviaria competente.

El siguiente paso es la ejecución del Análisis de Riesgos y Amenazas y el Análisis de RAMS. Su objeto es señalar las funciones determinadas y sus requisitos RAMS.

Una vez que se ha desarrollado la arquitectura del sistema, pueden distribuirse los requisitos de RAMS entre los respectivos componentes de la arquitectura.

La aptitud y eficiencia del control de RAMS se comprueba por medio de auditorías de seguridad y calidad periódicas.

La estrategia para satisfacer los requisitos de seguridad se elabora y documenta en el Plan de Seguridad. Las pruebas necesarias para el cumplimiento de los requisitos de RAMS se preparan durante la fase de diseño y ejecución, en especial por medio de las actividades de análisis y validación de la seguridad. Las pruebas se integran en el Dossier de Seguridad. Un Asesor de Seguridad Independiente, designado mediante acuerdo con el cliente y la autoridad ferroviaria competente, examina el Dossier de Seguridad.

### *2.3. Procedimientos y métodos analíticos de RAM*

Para investigar y documentar la disponibilidad del sistema pueden llevarse a cabo un análisis del mismo acorde con los requisitos tecnológicos. Se suelen emplear las siguientes técnicas analíticas:

- Análisis de modo y efecto de fallo (FMEA). O análisis de modo y efectos de fallo y criticidad (FMECA).

- Análisis de árbol de fallos (FTA).
- Análisis de Markov, diagramas de bloques de fiabilidad.

La estimación de la disponibilidad y del rendimiento operacional del sistema ferroviario la determina la empresa adjudicataria del Contrato (basándose en indicativos y referencias propias) y resulta especialmente útil para el operador ferroviario y sus justificaciones de coste/beneficios.

#### 2.4. *Mantenibilidad*

El alcance del mantenimiento, en todas sus variantes, preventivo, correctivo y predictivo, se desarrolla en el correspondiente Plan de Mantenimiento.

Las inspecciones a realizar dentro del mantenimiento preventivo están detalladas en el Plan de Mantenimiento a través de planificaciones anuales.

Las puestas en servicio de equipos pueden ser debidas a la reparación de incidencias, cuyo procedimiento de actuación queda reflejado en el Plan de Mantenimiento, o pueden realizarse tras las labores programadas de mantenimiento, las cuales están registradas en el Manual de Mantenimiento.

Para realizar las reparaciones requeridas en un sistema ferroviario de alta velocidad con unos parámetros de mantenibilidad tan exigentes, resultan fundamentales los siguientes parámetros:

- MDT (Mean Down Time): tiempo medio de caída de un sistema. Desde el fallo hasta que está en servicio de nuevo.
- MTTA (Mean Time to Arrive), expresado como Tiempo Medio de Respuesta en la Tabla de Mantenimiento Correctivo. Tiempo de desplazamiento hasta el lugar de la avería. Depende de los condicionantes logísticos del mantenimiento. En el contexto presente contiene las pérdidas logísticas.
- MTTR (Mean Time To Repair): tiempo medio utilizado para reparar un equipo. Cuenta desde llegar al sitio del fallo y hasta que el equipo se encuentra de nuevo operativo.

Para la correcta realización de las labores de mantenimiento el personal encargado del mismo, que dispondrá de una elevada cualificación avalada tanto por la experiencia en la realización de labores de mantenimiento, como por la formación específica en el funcionamiento de los sistemas, contará con un Sistema de Ayuda al Mantenimiento (SAM).

### 3. **Consideraciones del estudio del ciclo de vida**

El análisis del ciclo de vida de un producto o servicio supone que tienen una vida finita, un ciclo de duración que comienza con el inicio de su diseño, su creación, y termina con su retirada del mercado. Por tanto, el Ciclo de Vida es un conjunto de fases por las que atraviesa un producto o servicio desde su concepción hasta su desaparición o sustitución por otro más actualizado y más adecuado a las necesidades del mercado.

Es importante no confundir este término con el de vida útil a pesar de tener significados parecidos; la diferencia es que la vida útil abarca menos espacio en el tiempo que el ciclo de vida, ya que el primero es tomado en cuenta desde la puesta en marcha del elemento hasta que ocurra algún fallo irreparable, y el segundo desde antes de su materialización.

Las fases que definen el ciclo de vida, están constituidas por actividades con entidad propia y relacionadas entre sí, que cubren un objetivo parcial dentro de un proyecto. La determinación de las fases ayuda a simplificar la definición y ejecución del proyecto, es decir son fundamentales en la planificación (fase de inicio, fase de definición y fase de diseño), ejecución (fases de realización y operación) y finalización (fase de descarte o reciclaje) del proyecto.

### 3.1. Estudio del Coste del Ciclo de Vida

A lo largo de la vida de un elemento o sistema se generan costes, que junto con los gastos de adquisición, operación, mantenimiento, mejora, modificación y retirada es lo que se define como coste del ciclo de vida (Life Cycle Cost, LCC) el cual tienen que tenerse en cuenta a la hora de analizar la inversión.

Este coste va asociado a tres variables: costes asociados a la propiedad, periodo de tiempo durante el cual estos gastos incurren y la tasa de descuento que se aplica a los gastos futuros para equipararlos con los costes actuales.

Los gastos adquiridos durante el ciclo de vida se pueden agrupar en dos grandes categorías: los iniciales (efectuados antes de la entrada en servicio del producto) y los futuros (incurridos una vez que se ha producido de la puesta en servicio).

La definición de cada uno de los costes englobados dentro de estas dos grandes categorías es muy difícil ya que casi todos los costes en el momento del estudio del LCC son desconocidos, es lo que se conoce como el problema de la visibilidad de los costes. Por tanto, el cálculo del LCC se basa en previsiones y estimaciones, las cuales habitualmente se fundamentan en informaciones procedentes de la experiencia y cálculos teóricos realizados por el fabricante así como de la información suministrada tanto por clientes como fabricantes.

El análisis de LCC no es más que el valor resultante del cálculo teórico de los gastos que, previsiblemente, tendrá que afrontar el operador o el dueño del sistema o equipo durante toda su vida útil, como consecuencia del desempeño previsto para dicho sistema o equipo. Este análisis determina las diferencias en el valor neto actual de las opciones en competencia y ayuda a identificar la opción que ofrece el mejor valor para el propietario.

A continuación se muestra el denominado Diagrama Iceberg donde de una manera visual muy sencilla se aprecia la multitud de costes involucrados a lo largo del ciclo de vida de un producto y la magnitud de los mismos.



Fig. 1. Diagrama Iceberg de los costes del ciclo de vida

El valor o coste de un producto además de ser el que marca el fabricante es también lo que cuesta explotarlo. Hoy en día el coste de mantenimiento es el más significativo aunque se intente reducir, pero además del hecho de reparar un elemento que ha sufrido algún tipo de fallo, existen una serie de análisis previos y estudios que aumentan su valor a corto plazo pero lo disminuye considerablemente a medio y largo plazo; en otras palabras mejora el coste de explotación.

Para un equipo industrial con una vida de operación de 20 a 30 años, incluso más, existen costes significativos incurridos al adquirir el equipo, obtener partes y contratar servicios de mano de obra necesarios para conectarlo al servicio eléctrico, gas o agua, entrenar operarios, realizar mantenimiento y detección de fallos según se requiera a lo largo de la vida operativa del equipo. Los costes acumulados de estas actividades a menudo pueden exceder el precio de compra inicial.

En el presente, el coste de mantenimiento por sí mismo puede exceder por mucho el coste inicial de adquisición. El análisis del LCC proporciona el coste total probable a incurrirse durante la vida de una pieza del equipo. Los costes del ciclo de vida son dependientes del coste de mano de obra y los gastos contraídos y pueden aumentar considerablemente cuando el equipo falla durante el desempeño esperado. O falla dentro de unos pocos años después a la compra requiriendo disposición final y costes de sustitución imprevistos, así como la supervisión de estas tareas inesperadas.

Es de general aceptación que el 80 por ciento del coste de ciclo de vida es una función de decisiones hechas durante la etapa conceptual de un proyecto, cuando el cliente estudia una variedad de opciones. Como en cualquier decisión, cada alternativa tiene un impacto comercial que afecta el valor económico durante la vida entera del equipo. Este es el mejor momento para considerar las opciones que permitirán aminorar el coste total de propiedad, a través del ciclo de vida total del equipo.

Ocurre lo mismo con la disponibilidad (proporción de horas en que los equipos están operativos), la mantenibilidad (que indica la facilidad de los equipos para ser mantenidos, y suele estar expresada en unidades monetarias) o la eficiencia energética (a menor eficiencia, mayor gasto energético).

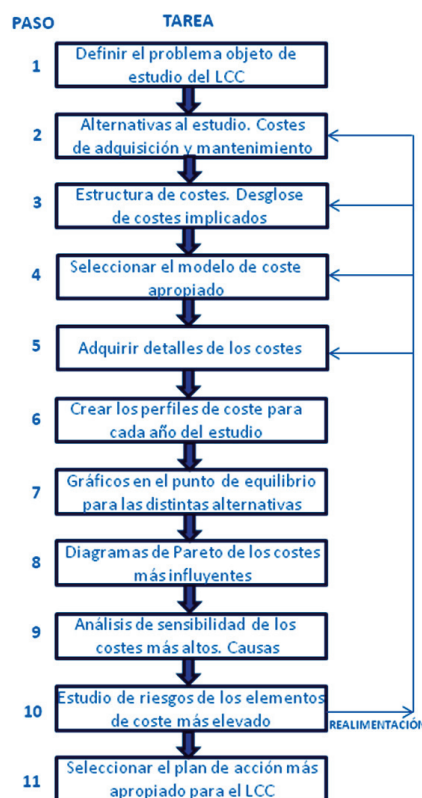


Fig. 2. Proceso del LCC

## 4. Programación del mantenimiento

### 4.1. Mantenimiento preventivo

Como su nombre indica el mantenimiento preventivo se ha diseñado con la idea de prever y anticiparse a los fallos de los elementos y/o conjuntos funcionales y por lo tanto de subsistemas y sistemas, es decir encontrar y corregir los posibles problemas menores antes de que estos provoquen fallos.

Tiene como principal objetivo la planificación de la intervención antes de que ocurran anomalías para así evitar que el sistema presente un bajo rendimiento de sus exigencias preestablecidas.

Para llevar a cabo este mantenimiento existen dos estrategias distintas:

- Estrategia de mantenimiento preventivo, que consiste en la ejecución de actividades de mantenimiento basadas en una planificación y unas prioridades fijas.

- Estrategia de mantenimiento predictivo que, como la estrategia anterior, ejecutan actividades de mantenimiento, pero planifica sus inspecciones a ejecutar en función del análisis del estado de los distintos elementos y no de las actividades a ejecutar, ni una periodicidad concreta.

Es imprescindible en este punto definir el concepto de fallo pues habitualmente es utilizado de forma incorrecta llegando incluso a confundirse con el término avería.

Se entiende por fallo el cese de aptitud de un elemento para realizar una función requerida. Por lo que la aparición de un fallo en un sistema o subsistema provoca la pérdida de capacidad para realizar las funciones solicitadas o la pérdida de capacidad para obtener resultados satisfactorios sobre unos requisitos especificados que provoca la transición del sistema desde un estado satisfactorio a un nuevo estado insatisfactorio conocido como estado de fallo.

La norma UNE- EN1360 aclara que “después del fallo el elemento presenta una avería, la cual puede resultar completa o parcial”. Por lo tanto, el fallo es un evento, a diferencia de la avería que es un estado.

Desde el enfoque de la capacidad para satisfacer las “necesidades” según las especificaciones implantadas, los sistemas pueden pertenecer dos posibles estados: estado de funcionamiento (SoFu) o estado de fallo (SoFa).

Es imprescindible la realización de mantenimiento preventivo sobre los denominados elementos recuperables, pues son los únicos capaces de recuperar su capacidad tras la aparición de un fallo.

Además de detectar el fallo es muy importante saber cómo y por qué se produjo. Las causas que provocan el fallo pueden ser el resultado de uno o más factores, derivados de sus circunstancias asociadas: fallo de diseño, fabricación, instalación, por uso inapropiado, por manipulación inadecuada o fallo relacionado con el mantenimiento.

Los fallos se pueden clasificar siguiendo unos índices como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 1. Clasificación de los fallos

Tipo de fallos	Descripción
Catastrófico	Alteración de la capacidad de trabajo (ruptura, deformación,...)
Paramétrico	Fallo parcial. Degradación de la capacidad de trabajo
Causal	Independiente: no origina el fallo en otros elementos
	Dependiente: consecuencia de la aparición del fallo en otros elementos
Repentino	Resultado de la variación repentina de parámetros esenciales
Gradual	Debido al envejecimiento y al desgaste
Estable	Se eliminan únicamente con la reparación
Temporal	Pueden desaparecer espontáneamente, sin intervención
Intermitente	Fallos temporales que se repiten muchas veces
De interrupción	Producidos en el sistema de operación
De bloqueo	Evitan el arranque o puesta en marcha del sistema
Revelable	Se exterioriza de forma inmediata tras su ocurrencia
Oculto	No se manifiestan al producirse, sino que son detectados
Primario	Intrínseco del elemento
Secundario	Consecuencia de las condiciones ambientales
Comando	Producidos por operación indebida
Modo común	Secundario + comando: fallan varios elementos, origen de una misma causa

El mantenimiento preventivo se ejecuta a intervalos predeterminados o de acuerdo a unos criterios con objeto de reducir la probabilidad de fallo o degradación de funcionamiento de un elemento. Puede ser sistemático y periódico, o condicional. Los periodos vienen determinados por la fiabilidad intrínseca del material, el aspecto crítico o el modo de degradación.

Por tanto existen tres tipos de mantenimiento preventivo:

- Preventivo programado o cíclico: revisa, detecta y elimina los defectos en el menor tiempo posible evitando los tiempos muertos de los equipos.

- Preventivo según estado: se realiza bajo el criterio de estado detectado durante la aplicación del mantenimiento preventivo y predictivo.

- Preventivo-predictivo: basado en la monitorización del funcionamiento.

En un contrato de mantenimiento de tanta duración es muy importante la correcta distribución del personal. Se propone para el mantenimiento preventivo la distribución en dos periodos: periodo de inicial o de inestabilidad y segundo periodo o periodo estale.

#### 4.2. Mantenimiento correctivo

Se define como los trabajos necesarios a realizar después de haberse producido un fallo, con el fin de devolver al componente o equipo el estado que le permita cumplir con las funciones para las que está instalado.

Existe el mantenimiento correctivo programado, que es llevado a cabo durante la realización del mantenimiento preventivo tras la aparición de anomalías en el normal funcionamiento de los equipos, y el mantenimiento correctivo no programado, debido a la necesidad de intervención inmediata, ya que tiene lugar siempre después de ser detectada una avería.

En el mantenimiento correctivo se consideran dos tipos de intervenciones: la paliativa (reparación de urgencia, no definitiva) y la intervención resolutive (reparación realizada con la profundidad necesaria como para darle a la intervención carácter definitivo).

### 4.3. Gestión de incidencias

Para una correcta y efectiva subsanación de cualquier anomalía ocasionada en la instalación es imprescindible la redacción e implantación de un Protocolo de Actuación en caso de averías. La rápida actuación, la eficacia en la coordinación de las diversas partes implicadas y la optimización de recursos disponibles son los puntos de referencia para el desarrollo de éste protocolo.

En este protocolo se ha de especificar la organización del Servicio de Avería, es decir la distribución del personal encargado tanto de las averías de primer nivel como las de segundo nivel.

A través del Plan de Actuación se manifiesta el procedimiento para la comunicación de la avería y su posterior cierre una vez se haya solucionado, así como la revisión técnica a realizar en los tres días posteriores a la actuación. En función del tipo de avería se determinan los grados de prioridad para la actuación.

Una vez se hayan solucionado las incidencias se deben documentar todas las actividades realizadas durante la actuación así como el procedimiento de información, comunicación y localización de la incidencia.

## 5. Programación de renovaciones

El objetivo de la programación de renovaciones es establecer los criterios para realizar las renovaciones de los productos instalados durante el periodo de mantenimiento.

Las renovaciones a realizar son de tres tipos:

- Renovaciones por obsolescencia, es decir, la caída en desuso de los equipos y tecnologías instaladas por un insuficiente desempeño de sus funciones en comparación con los nuevos equipos o tecnologías del mercado
- Renovaciones por fin de ciclo de vida útil, es decir, reposiciones. Sustitución del material cuando no cumple con la funcionalidad para la que fue instalado.
- Renovaciones tecnológicas. Es la sustitución de los equipos instalados por nuevas versiones de los mismos surgidas por la evolución técnica consiguiendo, así mayores prestaciones.

Debido a la naturaleza electrónica de los equipos, es fundamental la identificación de las versiones de Software instaladas en los mismos, así como la previsión de evolución de forma que nos permita planificar en el tiempo las renovaciones a realizar; las cuales condicionarán tanto el número de repuestos necesarios, el personal requerido y la programación de la formación con el objeto de disponer del personal capacitado en los periodos de mayor carga de trabajo.

### 5.1. Equipos sometidos a renovaciones

A continuación se enumeran los equipos sometidos a renovaciones:

- Equipos de Señalización: aquellos equipos que contienen un hardware que puede evolucionar y que pueden ser reemplazados como una mejora tecnológica (enclavamientos, sistemas controladores de objetos, RBC's, equipos informáticos,...).
- Equipos de comunicaciones: en función de lo recomendado y descrito por el suministrador.
- Cambios de funcionalidad (ERTMS SRS 2.3.0 d a SRS con línea base 3.0).

## 5.2. Tipos de renovaciones

**Reposición:** renovación de materiales consecuencia del fin de su vida útil. Para una instalación como la que se está estudiando, las reposiciones también se darán en el momento que un equipo o componente no cumpla con los índices de disponibilidad y fiabilidad mínimos exigidos para cada uno de ellos.

Para la ejecución del cambio de material, en las reposiciones se seguirá el proceso de mantenimiento correctivo definido para cada uno de los equipos, dejándolo tras la actuación en las mejores condiciones de fiabilidad, disponibilidad y seguridad, para lo cual se harán las pruebas pertinentes a la nueva puesta en servicio de forma que garanticen la máxima funcionalidad del equipo. Todos los cambios realizados serán actualizados en las bases de datos y en los correspondientes registros de mantenimiento.

Se puede establecer como criterio para las reposiciones, la disminución de calidad del producto en un 60%, lo que se traduce en malas condiciones de funcionamiento.

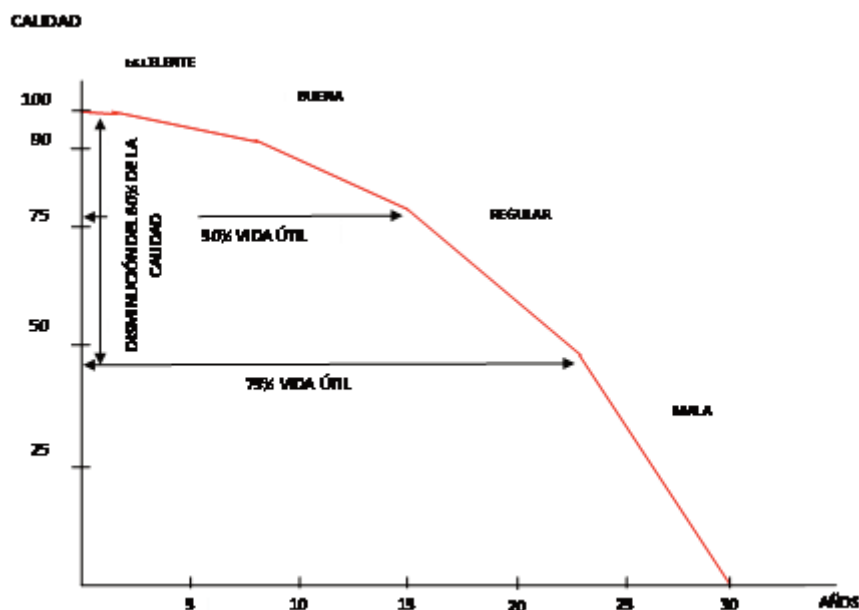


Fig. 3. Degradación de la calidad

**Renovación tecnológica:** las renovaciones debidas a la evolución tecnológica implican la sustitución de los equipos instalados por nuevas versiones de los mismos surgidas por la evolución técnica consiguiendo así mayores prestaciones. Las renovaciones tecnológicas serán aprobadas por el administrador de infraestructuras ferroviarias.

**Obsolescencia:** debido a la duración del Contrato de Mantenimiento, se hace necesario identificar la posible desaparición del mercado de algunos de los equipos que están dentro del alcance de este proyecto.

En el caso de ser adjudicatario de un proyecto de esta índole, para paliar el riesgo de la obsolescencia de los principales equipos, se propone pedir a los proveedores: compromiso de aviso con un año de antelación de la desaparición del producto, compromiso de soporte al mantenimiento durante la ejecución del mismo, certificado de disponibilidad de repuestos y carta de compromiso de compra de patente o de propuesta de una alternativa.



## **6. Conclusiones**

La actual financiación surgida para los proyectos de A.V en España así como las nuevas exigencias del contrato, no solo de señalización sino el contrato de mantenimiento asociado durante 20 ó 25 años de la instalación, exige diferentes estrategias para los estudios de los nuevos proyectos de A.V.

Este contrato de mantenimiento representa la mayor parte del coste del proyecto, lo cual implica que se deban optimizar las estrategias y medidas llevadas a cabo para la realización de las tareas de mantenimiento. Se precisa optimizar no sólo el personal capacitado para dichas actividades, sino las bases de mantenimiento requeridas, los materiales y equipos a emplear, las versiones, mejoras y evoluciones tecnológicas que sufrirán los equipos, los servicios asociados...

El cumplimiento del contrato de mantenimiento va asociado a los pagos por disponibilidad y fiabilidad del servicio, los cuales se especifican mediante los índices RAMS, por lo que se debe realizar una exhaustiva programación de las tareas de mantenimiento preventivo y predictivo, así como concentrar la tareas de mantenimiento de correctivo, siempre que sea posible en la banda nocturna de mantenimiento, de forma que no exista afección al sistema, y en caso de que no pueda evitarse, que sea la menor posible.

Por tanto la nueva tendencia implicará desarrollo e investigación en procesos de mantenimiento, planes de formación asociados, nuevos equipos con mayor vida útil y mejores prestaciones así como mayor importancia en las actividades de mantenimiento preventivo y predictivo.

## **Referencias**

[1] García, A., Barrón, I., Puente, F., Martín, M<sup>a</sup>.P. (2011). La alta velocidad en España: líneas y trenes. Documentación MSF de la Universidad Pontificia Comillas.

[2] García, M<sup>a</sup>. A. (2011). Mantenimiento del material rodante. Documentación MSF de la Universidad Pontificia Comillas.

[3] UNE-EN 13306 (2002). Terminología del mantenimiento.

[4] UNE-EN 50126 (2005). Aplicaciones ferroviarias. Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS).

[5] UNE-EN 50128 (2002). Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Software para sistemas de control y protección del ferrocarril.

[6] UNE-EN 50129 (2005). Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Sistemas electrónicos relacionados con la seguridad para la señalización.

## **Agradecimientos**

Al departamento de ITC (Installation, Test and Commissioning), con mención especial a su director Carlos Mateo, por haberme permitido trabajar junto a ellos y aprender de su experiencia y buen hacer.

A mi familia, especialmente a mi padre por introducirme en el apasionante “mundo ferroviario”.



# Configuración e Implantación del Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 en el tramo entre Plaza España -Martorell Enllaç de la línea Llobregat - Anoia de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC)

## *Configuration and Implementation of ERTMS/ETCS Level-1 System in the section between Plaza España - Martorell Enllaç of the line Llobregat - Anoia of Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC)*

Pedro de la Rubia Moreno\*, Alejandro Berenguer Morón, Sonia Bernad Bernad, Jordi  
Ribera Fàbregas

*Señalización y Protección del Tren, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (Barcelona), España*

---

### Resumen

Actualmente el tramo entre Plaza España y Martorell Enllaç de la línea Llobregat-Anoia de FGC, tiene en servicio como sistema de Señalización y Protección del tren el FAP. En el presente proyecto se pretende instalar sobre dicho sistema, el ERTMS/ETCS Nivel-1 para conseguir una mejora en el control y la supervisión de los trenes. Por tanto, el sistema FAP no desaparece, sino que queda de respaldo. Utilizaremos los diferentes elementos de vía existentes, y se instalarán los equipos necesarios para el funcionamiento del ERTMS/ETCS Nivel-1. Todo ello interfiriendo lo menos posible en el servicio diario de trenes y sin modificaciones sustanciales de las instalaciones actuales.

Palabras clave: ERTMS, ETCS, Nivel-1, FAP, FGC, Señalización, Protección Tren, Supervisión, Instalaciones, Servicio Diario.

### Abstract

*Currently the section between Plaza España and Martorell Enllaç of Llobregat-Anoia line of FGC, it is in service as a system Signalling and Train Protection, FAP. This project aims to install on this system, the ERTMS/ETCS Level-1 to achieve an improvement in the control and supervision of the trains. Therefore, the FAP system does not go away, but remains a backup. We will use the different rail that now exist, and will be installed the necessary equipment for the operation of ERTMS/ETCS Level 1. All this with minimal interference in daily train service without substantial modifications to existing facilities.*

*Keywords: ERTMS, ETCS, Level-1, FAP, FGC, Signalling, Train Protection, Supervision, Facilities, Daily Service .*

---

## **1. Objetivos**

Dentro del presente proyecto podemos definir dos objetivos principales, que son los siguientes:

1. Realización de un estudio del Estado del Arte de la Señalización y Protección del Tren que en estos momentos está en servicio en el tramo Plaza España – Martorell Enllaç de la línea Llobregat – Anoia de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC).

2. Teniendo en cuenta los resultados del primer punto, se realizará un estudio de Implantación del Sistema ERMS/ETCS Nivel-1 en el tramo Plaza España – Martorell Enllaç de la línea Llobregat – Anoia de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, sobre el sistema actual de Señalización y Protección del Tren que actualmente está en servicio (FAP). Se tendrá en cuenta en la realización del proyecto que durante la implantación de dicho sistema se interfiera lo mínimo posible en la circulación de los trenes.

Para el presente proyecto se comenta con FGC si sería necesario un nuevo recantonamiento de la señalización para poder modificar los intervalos de trenes e incrementar el número de éstos. FGC no cree conveniente un nuevo recantonamiento, por lo que se asumen los cantones actuales para la implantación del Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1. Además se cree conveniente seguir trabajando con la empresa suministradora de los equipos de protección del tren; DIMETRONIC.

## **2. Solución propuesta**

La solución propuesta en este Proyecto es con el fin de conseguir una mejora en el Control y la Supervisión de los Trenes 1 en el tramo Plaza España – Martorell Enllaç de la línea Llobregat – Anoia mediante el Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1. La razón de la adopción de esta solución, está basada en las necesidades de explotación, operación y coste económico, que son fundamentales para FGC. Son los siguientes:

- Incremento del control y la supervisión de los trenes, del Maquinista y la mejora del confort de los viajeros.
- Tener un sistema de protección del tren normalizado a nivel estándar europeo. También se tiene la posibilidad de interoperabilidad entre trenes de otras Administraciones que puedan circular por la línea en cuestión y que estén equipados con ERTMS/ETCS Nivel-1.
- No interrumpir el servicio de trenes durante la instalación del nuevo sistema.
- Mantener las instalaciones actuales, sin tener que hacer grandes modificaciones en las mismas.
- Que el coste económico de la instalación del nuevo sistema esté dentro de un orden de magnitud de mercado, respecto a otros sistemas menos competitivos y más caros.
- Mejorar el control sobre los equipos para poder diagnosticar las averías lo más rápido posible.

A continuación tenemos la situación de la línea Llobregat-Anoia de FGC en el plano de la Red Metropolitana de Transporte de Barcelona, así como sus 22 estaciones ordenadas (de Plaza España a Martorell Enllaç). También podemos ver el tipo de material móvil que circula por esta línea; UTE 213.

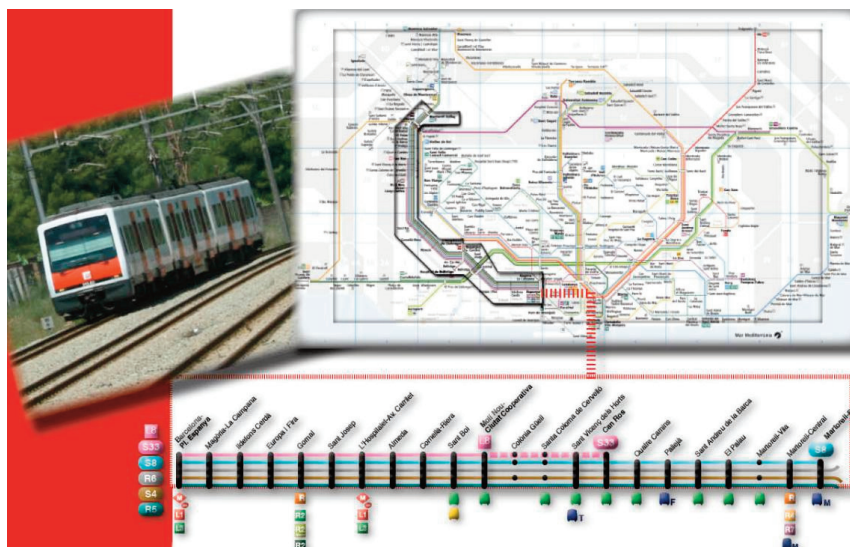


Fig. 1. Situación de la línea Llobregat-Anoia de FGC

### 3. Instalaciones que se desarrollan en este proyecto

- Sustituir los Enclavamientos de Módulos Geográficos por Enclavamientos Electrónicos en las estaciones de Cornellá, Gornal, Hospitalet y Sant Vicenç dels Horts. Este cambio se efectúa como consecuencia de que la interface entre el Enclavamiento de Módulos Geográficos y los equipos ERTMS/ETCS Nivel-1 tendría un coste prácticamente igual que si sustituimos el Enclavamiento de Módulos Geográficos por Enclavamientos Electrónicos (ENCE) directamente. Este cambio también mejorará el mantenimiento de los citados ENCE i del servicio, ya que podrán ser tele-comprobados desde el Centro de Mantenimiento de Sant Boi.



Fig.2. Cabina de relés de un Enclavamiento de Módulos Geográficos



Fig. 3. Puesto de mando Local (PML) del Enclavamiento de Sant Boi

- El cambio de los Enclavamientos de Módulos Geográficos por ENCE también implica la sustitución de los Puestos de Mando Locales (PML) por los Puestos de Operación Locales Videográficos (PLO), es especial en Sant Boi que hay un ENCE y tenemos un PML. Este también se cambiará por un PLO.

- Para efectuar el cambio de los Enclavamientos de Módulos Geográficos por ENCE se tiene que aplicar una estrategia controlada y supervisada por FGC y que

implica bastante trabajo nocturno dentro de la habitación del Enclavamiento.

- Se prepararán las habitaciones del ENCE para que se puedan instalar y montar los equipos de ERTMS/ETCS Nivel-1 y quede espacio suficiente para que el personal de Mantenimiento tenga un lugar de trabajo amigable y saludable.

- Se montarán los componentes necesarios de protecciones y seccionamientos para alimentar los equipos de ERTMS/ETCS Nivel-1, desde las salidas del SAI, que en estos momentos existen en las habitaciones de los Enclavamientos.

- En aquellas Dependencias Técnicas de Enclavamiento en que el SAI no tenga la potencia necesaria para alimentar los equipos ERTMS/ETCS Nivel-1, se cambiarán por otro que tenga la potencia adecuada. Si en el Enclavamiento de Módulos Geográficos no se tuviera SAI se montaría uno nuevo para alimentar el ENCE y los equipos de ERTMS/ETCS Nivel-1.

- Se tendrá en cuenta los ENCE que no tengan aire acondicionado para efectuar la instalación de los equipos necesarios para mantener la temperatura del ENCE dentro de los márgenes de temperatura adecuados y recomendados por el tecnólogo.

- Se montarán los equipos ERTMS/ETCS Nivel-1 en las Dependencias Técnicas donde están situados los ENCE y habilitadas para poder inquirir los mencionados equipos. Antes se habrán hecho las modificaciones de obra civil e instalaciones para que sea posible la instalación de los citados equipos ERTMS/ETCS Nivel-1.

- Se hará la instalación de los equipos de comunicación (switch, router, etc.), dentro de la dependencia técnica mediante una red Ethernet TCP/IP, por la comunicación interna de los equipos del sistema ERTMS/ETCS Nivel-1, los cuales se conectarán a la Red Privada de Señalización de comunicación interna de FGC, a partir de los switches correspondientes y compuesta por dos redes de fibra óptica redundantes de diferente recorrido. Estas dos redes de fibra óptica darán soporte a las comunicaciones redundantes de la Red Privada de Señalización que aglutinará todo el sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 y los bloqueos entre ENCE. Esta comunicación aglutina también la comunicación con el PCE (Puesto de Control del ERTMS), situado en el CCI (Centro de Control Integrado) de Rubí.

- Se efectuará la instalación de los cables de comunicación y de alimentación (amplificadores, y regeneradores de señal) en función de la distancia entre el LEU y la baliza conmutable, que interconectan los LEU's situados en las dependencias técnicas del ENCE, con las balizas conmutables situadas en la vía, la baliza fija no necesita ningún tipo de conexión. Los cables de comunicaciones que unen el LEU con la baliza conmutable se denomina interface "C".

- Se montarán las balizas conmutables y fijas en la caja de la vía a la distancia de la señal correspondiente y reglamentada por las normas UNISIG (Nombre dado al conjunto de empresas de tecnología de Señalización y Protección del Tren que participaron en la redacción de las Directivas ERTMS/ETCS).

- Se efectuará el montaje e instalación de los equipos que componen el PCE, Puesto de Control del ERTMS/ETCS Nivel-1, en el CCI (Centro de Control Integrado) de Rubí.

- También se montarán los equipos ERTMS/ETCS Nivel-1 a bordo del Material Móvil (ETCS, antena, odómetros, etc.) que circulan por esta línea de Llobregat- Anoia, en convivencia con el equipo FAP. Se montará el DMI (IHM).

- Obra civil auxiliar para reparar y condicionar las canalizaciones, zanjas, arquetas por donde tenga que hacerse el tendido de los cables de Protección del Tren del sistema ERTMS/ETCS Nivel-1.

#### 4. Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 para FGC

El Nivel-1 del sistema ERTMS/ETCS es un sistema de control de trenes con transmisión puntual y protección continua. La comunicación con el tren es unidireccional, es decir, el tren solo recibe información de las balizas. Los parámetros básicos que este sistema transmite al tren son:

- Autorización de Movimiento (MA), dentro del MA está situada la distancia objetivo.
- Velocidad máxima.
- Gradiente de la vía.
- Geometría de la plataforma.
- Próximo grupo de balizas.
- Otras posibles funcionalidades que es la Administración Ferroviaria la que tiene que escogerlas para su explotación y operación.

#### 4.1. Equipos que conforman el Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1

Los equipos que conforman este sistema podemos dividirlos en 2:

- Equipos de Campo: instalados en Dependencias Técnicas o en vía.
- Equipos Embarcados: instalados a bordo del tren.

Equipos de Campo:

A continuación tenemos de forma esquemática todos los equipos de campo que forman el Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 así como su conexión a la Red Privada de Señalización. Los Enclavamientos Electrónicos (ENCE) también los ponemos ya que aunque no son equipamiento ERTMS/ETCS Nivel-1 en sí, son imprescindibles para su funcionamiento.

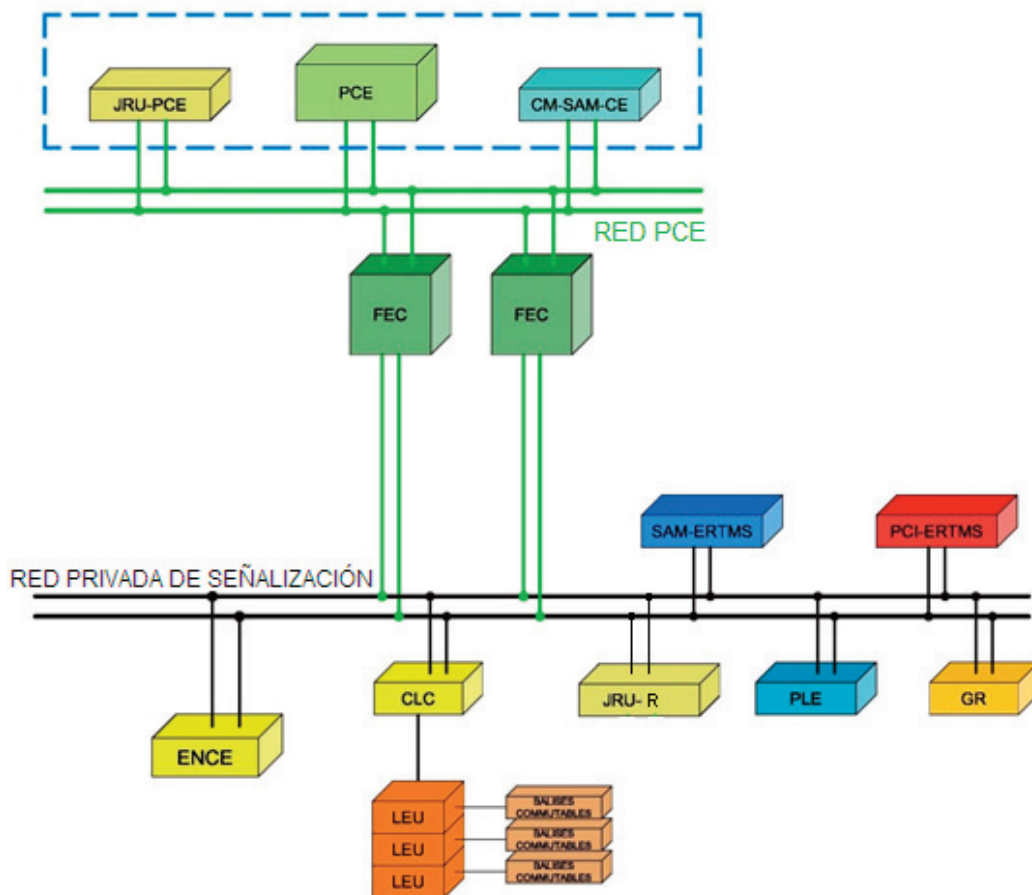


Fig. 4. Esquema de equipos que conforman el sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 y sus comunicaciones

- Baliza: es energizada por la antena del tren a 27 MHz. Envía un telegrama que es captado por la antena del tren. Tenemos 2 tipos de balizas:

- Fijas: no varían la información, siempre es la misma. Nos dan información que no varía, como puede ser el PK en que nos encontramos o gradiente de la vía (entre otros).

- Conmutables: transmiten información variable recibida del LEU. La información puede provenir del ENCE o de los Puestos de Mando Local o Central. Suelen dar información acerca de Autorizaciones de Movimiento (MA), Fin de Autorización de Movimiento (EOA), Limitaciones Temporales de Velocidad (LTV), entre otros.



Fig. 5. Baliza

- LEU: Codificador de Balizas. Es el responsable del envío a las balizas conmutables de los telegramas que éstas han de enviar al tren. Recibe la información a través del CLC, la cual viene del ENCE y del GR. Cada LEU controla hasta 4 balizas conmutables.

- CLC: Controlador Centralizado de LEU's. Governa de forma centralizada los LEU's instalados bajo la cobertura de un mismo ENCE. Recibe la información del estado de los equipos de campo de señalización desde el ENCE, y la distribuye a los LEU's que tiene conectados. Un CLC puede controlar hasta 12 LEU's.

- SAM-R: Sistema de Ayuda al Mantenimiento de ERTMS/ETCS Nivel-1. Permite la monitorización de los equipos ERTMS Nivel-1 situados en la Dependencia Técnica.

- PCI-ERTMS: Equipo de Interface de Comunicaciones. A través de él, es Puesto de Mando Central (PCE) se comunica con los equipos locales; con GR y con PLE (Puesto de mando Local).

- JRU-R: Registrador jurídico de los eventos que puedan ocurrir en los siguientes equipos: CLC, PLE, GR y LEU.

- GR: Gestor de ERTMS. Es el responsable de la activación o actualización de la LTV's. Recibe las órdenes tanto del PCE como del PLE.

- PLE: Puesto de Mando Local. Gestiona la zona que le ha estado asignada, que es la misma que la del ENCE. Está pensado para coger el control del GR y del CLC en caso de que se pierda la comunicación con el Puesto Central, o se averíe alguno de los equipos del PCE, por tanto, tiene la misma funcionalidad que el PCE pero en su zona asignada. Se le puede adjudicar el mando desde el PCE o por emergencia.

- PCE: Puesto de Mando Central de ERTMS. Es un sistema de control centralizado para efectuar la supervisión y mando del Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 desde un único punto.

- Permite la representación del estado de los equipos del sistema instalados en campo a través de la Red Privada de Señalización.

- Capaz de gestionar las LTV's mediante el GR, así como acceder a los SAM's locales y a los PLE's distribuidos a lo largo de la línea.

- Tiene información sobre las órdenes, comprobaciones y alarmas de los equipos del Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1.

- Esta situado dentro del CCI (Centro de Control Integrado), que FGC tiene en la localidad de Rubí (Barcelona).





Fig. 6. Simulación del Puesto de Mando Central de ERTMS (PCE) en el CCI de FGC

Equipos de a bordo:

A continuación tenemos, en modo esquemático, los equipos que lleva embarcados el tren:

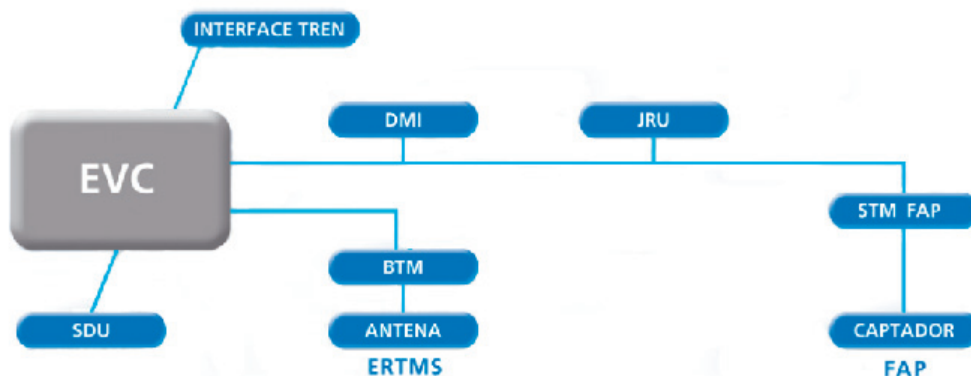


Fig. 7. Equipos embarcados en el tren (ETCS)

- EVC: European Vital Computer. Es el corazón del sistema ETCS. Es un conjunto de procesadores vitales que recibe toda la información exterior (proveniente de balizas) así como la del interior del tren (diferente sensorica instalada a bordo). Se encarga de procesar dichas informaciones y da las instrucciones pertinentes (curvas de frenado, freno de emergencia, generación de alarmas, etc.). La información relevante la representa en el DMI para la atención del Maquinista.

- Odómetro.

- DMI: Drive Machine Interface. Es el interface con el Maquinista.



Fig. 8. Situación del DMI en (izquierda) Unidad 213 de FGC y (derecha) en Locomotora Diesel de FGC

Son los 2 tipos de material móvil que circulan por la línea.

- JRU: Registrador Jurídico. Registra todos los datos que pasan por el EVC
- BTM: Equipo decodificador de los mensajes que recibe la antena del tren.
- Interface Tren: Interface con los circuitos principales y auxiliares del tren (alimentaciones, activación del freno y de la tracción, etc.) y con el EVC.

## 5. Redes de comunicación del Sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 para FGC

Podemos distinguir tres tipos red, cada una de ella con sus particularidades. Veámoslas:

### 1. Red Local ENCE:

Esta red es una doble red LAN con dos Switches redundantes, en forma de anillo, y comunica los equipos que están dentro de cada enclavamiento (ENCE, CLC, LEU's, SAM-R, PLE, JRU-R y en el enclavamiento de Sant Boi también GR y PCI). La estructura se repite en cada uno de los enclavamientos.

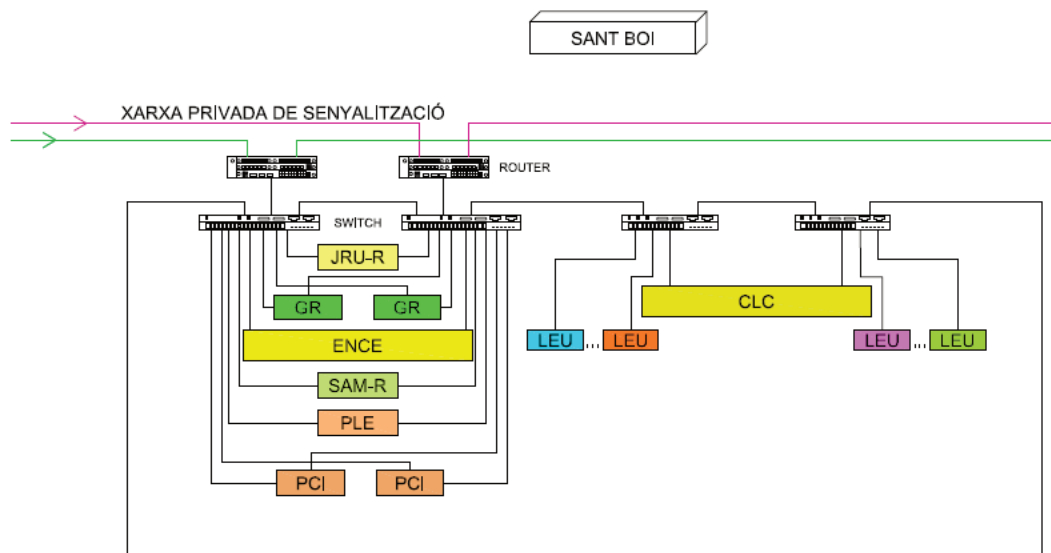


Fig. 9. Ejemplo de red local del ENCE de Sant Boi, en el cual es donde más equipos encontramos conectados

### 2. Red Privada de Señalización:

Esta red está formada por 2 canales de comunicación redundantes y de fibra óptica, que recorren la línea entre Pl.España y Martorell Enllaç. Sirve para comunicar los equipos de ERTMS/ETCS Nivel-1 que se encuentran dentro de un enclavamiento, con otros equipos que están dentro de otros enclavamientos (también de ERTMS/ETCS Nivel-1), o para comunicar también con el CCI.

### 3. Red local del PCE:

Esta red es una doble red LAN con 2 switches redundantes que se encuentran en el Centro de Control Integrado (CCI), y que la forman PCE, SAM-CE, CM, JRU-CE.

Una vez llegan los 2 canales de comunicación de la Red Privada de Señalización mediante los cables de fibra óptica y con la información de los equipos ERTMS/ETCS Nivel-1, estos se conectan cada uno a un router (1, 2), y cada uno de ellos se conecta a 2 switches (3, 4). Se mantiene el criterio de redundancia de equipos y de canales.

Los switches (3, 4) se conectan a los servidores que hacen la función de Front End de comunicaciones y desde este equipo a los switches 1 y 2 que son los que conforman la LAN del PCE. Estos dos switches reciben la información de todos los equipos que conforman el PCE.

Dentro del CCI se ubica también el CTC (Telecontrol de Tráfico), el cual puede intercambiar información con el PCE y viceversa, pero nunca se podrán enviar órdenes de un sistema al otro. La comunicación entre las LAN del CTC y la del PCE se hace con los equipos SIE (Servidor de Interface Externo), que forma un firewall para evitar intrusiones de personas no autorizadas.

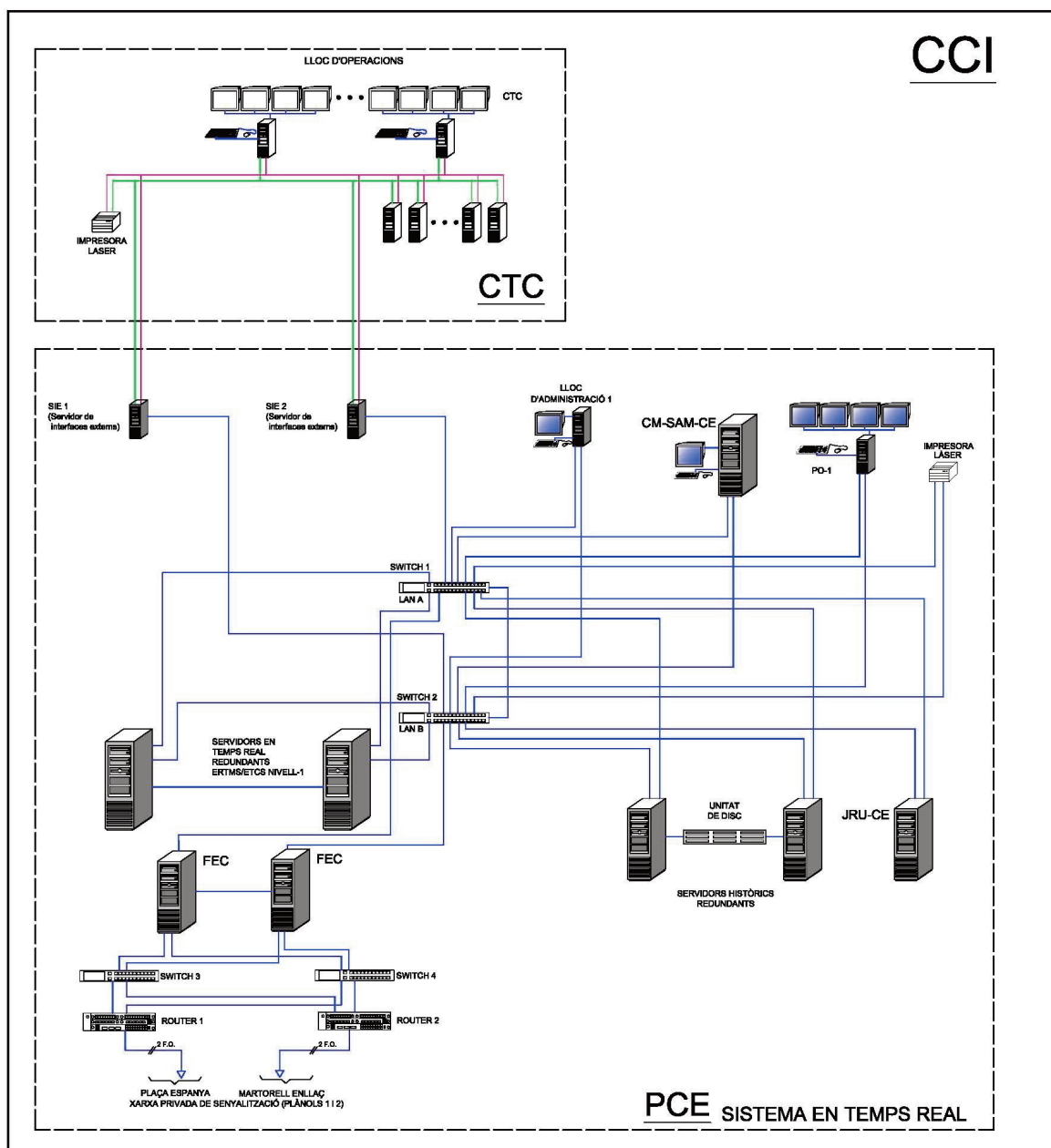


Fig. 10. Esquema de la red local del PCE (dentro del CCI)

## 6. Implantación del sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 a FGC

### 6.1. Datos de partida

Partimos de una línea que dispone de un sistema de señalización y protección del tren (FAP), el cual convivirá con el nuevo sistema ERTMS/ETCS Nivel-1. La implantación de los equipos nuevos se hará de acuerdo con lo que ya está instalado actualmente. Se respetará la disposición de los diferentes elementos de vía (señales, accionamientos de aguja, balizas FAP, circuitos de vía, etc.)

Tenemos un total de 12 enclavamientos, controlando 244 señales repartidas en 33 km de vía.

FGC no dispone de ninguna normativa propia sobre el sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 ya que en ninguna de sus líneas está instalado este sistema. Por tanto, para este proyecto se han utilizado las normas UNISIG y las normas que exige ADIF para sus líneas.

### 6.2. Ubicación de las balizas

Aplicando las normas UNISIG y de ADIF, nos queda que una distancia mínima entre balizas de 2,3m. Como la distancia entre traviesas es de 60cm., la distancia entre balizas será de 2,4m., equivalente a 4 traviesas.

En señales de entrada, salida y de trayecto nos queda:

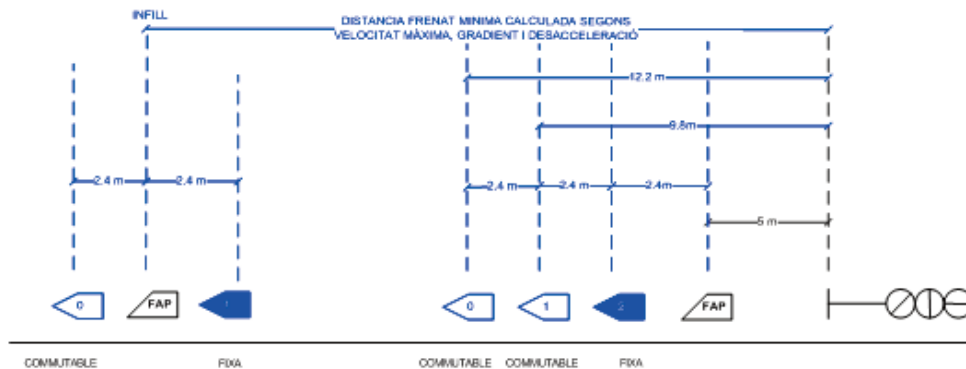


Fig. 11. Ubicación de las balizas FAP, fijas y conmutables

Otro aspecto importante para este proyecto son los puntos de transición entre los sistemas FAP y ERTMS/ETCS Nivel-1, conocidos como NIVEL STM.

En estos puntos se introduce un cambio de sistema de protección el cual hace que los equipos embarcados conmuten de sistema de Protección del Tren de manera automática.

Para hacer el cambio de sistema FAP a ERTMS/ETCS Nivel-1 y de ERTMS/ETCS Nivel-1 a FAP se han generado unas transiciones de acuerdo con las reglas de ingeniería UNISIG. Por el sistema FAP se han utilizado las reglas de Adif ya que la funcionalidad del sistema de Protección del Tren que utiliza Adif (ASFA) es el mismo que el de FGC (FAP). Sólo se diferencian con las distancias de pie de señal y la baliza previa.

### Transición de FAP a ERTMS/ETCS Nivel-1

Los criterios que se han utilizado para realizar la transición entre sistemas son los siguientes:

- El anuncio de transición desde FAP a ERTMS/ETCS Nivel-1 se dará mediante un telegrama en un Grupo de Balizas (BG) fijas o conmutables, previo al Grupo de Balizas (BG) de señal principal, estas BG previas son las que dan el orden al tren para efectuar el cambio de modos de conducción y de protección del tren.

- La distancia entre balizas que tienen que dar el orden del tren por el cambio del sistema de conducción y de protección del tren será la distancia desde la señal principal y el BG asociado a la baliza previa de FAP, más 50m para situar la baliza fija o conmutable que es la que dará el orden al tren de cambio de sistema de conducción y de protección del tren. Por ejemplo, si la distancia escogida al punto de información de orden es de 300m la distancia entre anuncio y orden será de 350m.

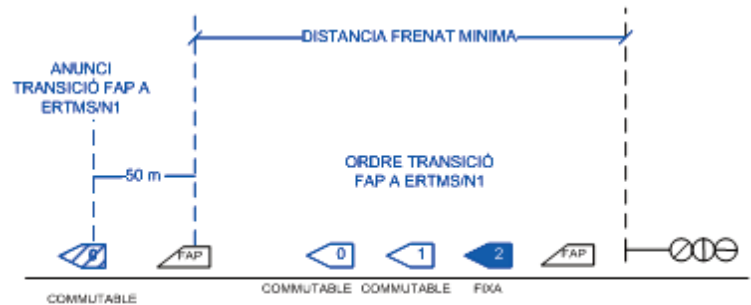


Fig. 12. Esquema de las distancias y situación de las balizas

- La orden de transición se dará en el Grupo de Balizas (BG) de la señal principal, además también tendrá que enviar una Autorización de Movimiento (MA), una LTV si la explotación de FGC la cree necesaria o una Limitación Permanente de Velocidad (LPV) para poder hacer la transición de modos de conducción y de protección del tren, así como todas las características de la vía, velocidad máxima del tren, gradiente de vía, geometría de la vía, etc., necesarias para efectuar la conducción en ERTMS/ETCS Nivel-1.

### Transición ERTMS/ETCS Nivel-1 a FAP

Los criterios que se han utilizado para realizar la transición entre sistemas son los siguientes:

- El anuncio de transición desde FAP a ERTMS/ETCS Nivel-1 se dará mediante un telegrama en un Grupo de Balizas (BG) fijas o conmutables, previo al Grupo de Balizas (BG) de señal principal, estas BG previas son las que dan el orden al tren para efectuar el cambio de modos de conducción y de protección del tren.

- La orden de anuncio de cambio de sistema de conducción y de protección del tren mediante el BG, se efectuará como mínimo a una distancia entre balizas del BG del orden de 5 segundos a la velocidad máximo del tramo donde se efectúe la transición.

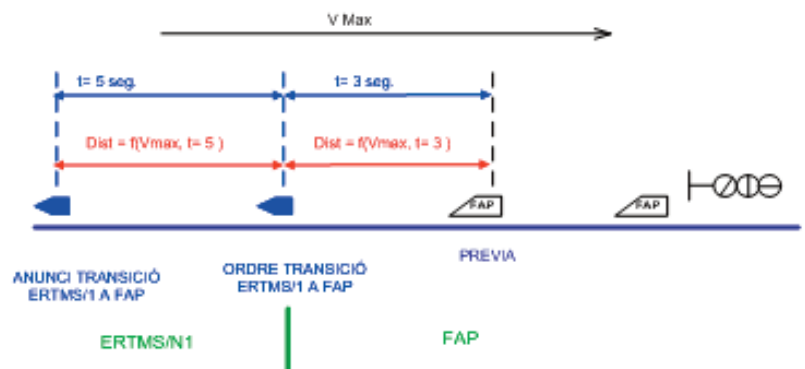


Fig. 13. Esquema de las distancias y situación

- La orden de transición mediante el BG, se efectuará a la distancia en la que el Maquinista pueda ver la indicación del foco de la señal principal. Esta señal tendrá una baliza FAP de señal y baliza de FAP previa.

- La orden de transición se efectuará a una distancia mínima recorrida en 3 segundos a la velocidad máxima del tramo, antes de la baliza previa FAP de la señal principal asociada.

**Restricciones de distancia LEU-Baliza**

Tenemos 3, que varían según la distancia. Si la distancia es inferior a 1500m. el cable de interface “C” se conecta directamente a la caja de bornes de la baliza. Si la distancia está entre 1500m. y 4000m. se instala un amplificador de señal, y si la distancia es superior a 4000m. se colocará un regenerador de señal a 1500m. del LEU así como un amplificador a pie de baliza.

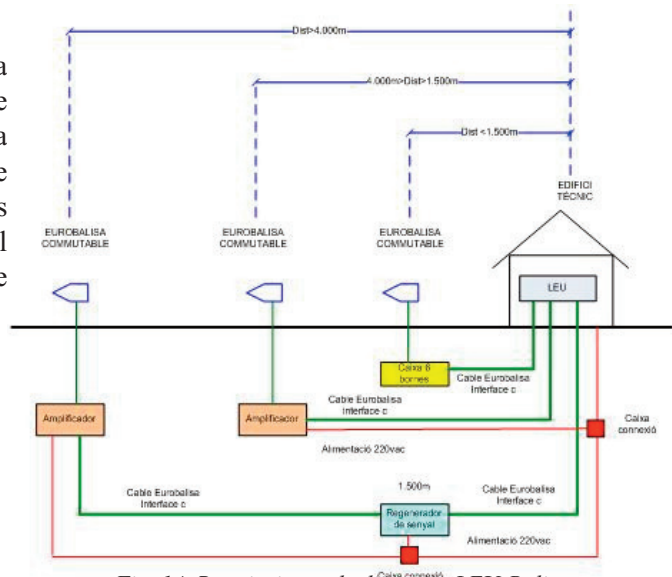


Fig. 14. Restricciones de distancia LEU-Baliza

**7. Mediciones. Cantidad de equipos**

Tabla 1. Cantidad necesaria de los principales elementos del sistema ERTMS/ETCS Nivel-1

Eurobaliza Fija	379	LEU	146	PCI	2
Eurobaliza Conmutable	572	CLC	17	PCE	1
Cable interface "C" interior	130915 m	SAM-R	12	SAM-CE	1
Cable interface "C" exterior	430410 m	JRU-R	12	JRU-CE	1
Caja conexión eurobaliza	457	PLE	12	ENCE	4
Cajas amplificadoras señal	116	GR	2	Router / Switch	52 / 26

**8. Presupuesto**

Tabla 2. Presupuesto de la Configuración e Implantación del Sistema ERTMS / ETCS Nivel-1.

<b>TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL</b>	31.210.467,18 €
15% de Beneficio Industrial y Gastos Generales	4.681.570,10 €
<b>TOTAL PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN</b>	35.892.037,28 €
18% de IVA	6.460.566,71 €
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	42.352.603,99 €

## **9. Conclusiones**

El resultado de este Proyecto nos ha permitido confirmar los objetivos expresados anteriormente:

- Incremento del control y la supervisión de los trenes, del Maquinista y la mejora del confort de los viajeros.
- Tener un sistema de protección del tren normalizado a nivel estándar europeo. También se tiene la posibilidad de interoperabilidad entre trenes de otras Administraciones que puedan circular por la línea en cuestión y que estén equipados con ERTMS/ETCS Nivel-1.
- No interrumpir el servicio de trenes durante la instalación del nuevo sistema.
- Mantener las instalaciones actuales, sin tener que hacer grandes modificaciones en las mismas.
- Que el coste económico de la instalación del nuevo sistema esté dentro de un orden de magnitud de mercado, respecto a otros sistemas menos competitivos y más caros.
- Mejorar el control sobre los equipos para poder diagnosticar las averías lo más rápido posible.

Por estas razones recomendamos la implantación del Sistema de Protección del Tren ERTMS/ETCS Nivel-1 en el tramo Pl. España-Martorell Enllaç de la línea Llobregat-Anoia de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

## **10. Referencias**

- [1] Apuntes de Enric Domínguez Saura de la asignatura Señalización y Protección del Tren del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica (EPSEVG-UPC).
- [2] Planos de la línea Llobregat-Anoia facilitados por Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.
- [3] Documentación aportada por la empresa DIMETRONIC sobre sus equipamientos de ERTMS/ETCS Nivel-





## Ventajas de la participación pública en el estudio de alternativas de trazados ferroviarios

### *Benefits of public participation in the study and design of railroads alternatives*

Sofía Agustín Escriche\*

*Departamento de Ingeniería e Infraestructura del Transporte, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 46022, España*

---

#### Resumen

El objetivo principal de este trabajo es detectar las ventajas de la participación pública integrada en el diseño de trazados ferroviarios. Se ha empleado el estudio de caso (investigación cualitativa) de la LAV Poitiers-Limoges en Francia concluyéndose que es posible integrar la participación pública en fase del diseño, lo que permite tener un mayor conocimiento del entorno, optimizar los trazados propuestos y sus medidas correctoras, facilitar y hacer comprender la elección y estar cerca del objetivo de “cero alegaciones” en la fase de información pública. Con todo, si se aplica este procedimiento en España se podrán tener infraestructuras mejor adaptadas a su entorno y más sostenibles.

Palabras clave: Participación pública, estudio informativo, trazado ferroviario, concertación ciudadana, diseño, proyecto, LAV

#### Abstract

*The main objective of this work is to detect the benefits of integrating public participation in the design of railway lines. To do this, the research technique which has been used is the “case study” (qualitative research) of the high-speed railway between Poitiers and Limoges in France. The research concluded that the integration of public participation in the design of railroads makes to be possible aware of the environment, to optimize the proposed railroads and its corrective measures, to facilitate the election and have “zero statements” in the public information as a legal process. However, if this procedure is used in Spain, we may have better infrastructures adapted to their environment and they should also be more sustainable.*

*Key words: Public participation, basic project, study, railroad, high-speed railway, public involvement, design, project*

---

### 1. Introducción

En la actualidad, existe una necesidad creciente de participación y constante diálogo entre la sociedad (los ciudadanos como usuarios de las infraestructuras) y las administraciones públicas que desarrollan la acción de gobierno (como promotores de las mismas). Esta necesidad no sólo permite a las administraciones un acercamiento mayor hacia la ciudadanía, como fórmula para garantizar una adecuada satisfacción de sus necesidades y expectativas, sino que ayuda a la planificación y desarrollo técnico de las soluciones, gracias a la aportación del criterio y la experiencia de los ciudadanos.

En los últimos años, hemos visto que se ponían en marcha políticas de la Unión Europea en materia de Participación Pública. Estas políticas (plasmadas en la Directiva 2003/4/CE o en la Directiva 2003/35/CE), además de fomentar el acceso a la información por parte de los ciudadanos en todo aquello que tiene que ver con las afecciones al medio natural, impulsan la participación. En España, Francia y muchos otros países, se

trasponen en leyes estatales y autonómicas. Sin embargo, a pesar de la proliferación de legislación o de programas de fomento de la participación pública, se aprecia que existe una carencia en los técnicos que realizan estudios, proyectos o programas a la hora de diseñar un proceso de participación pública adaptado al entorno y que sea capaz de cumplir los objetivos de cada actuación.

En general, se manifiesta la no existencia de una reflexión previa, se ponen en marcha procesos participativos que no están adaptados al medio sólo con el objetivo de cumplir los requerimientos legales. Se pierde por tanto, una de las ventajas fundamentales de la participación pública como es la toma de datos para la realización de proyectos de infraestructuras cada vez más adaptadas a su entorno, menos impactantes al medio natural y más sostenibles.

Por otro lado, los proyectos de transporte que resultan más difíciles de aceptar por la población son los proyectos ferroviarios pues, a diferencia del transporte por carretera el acceso a los servicios que proporciona el ferrocarril no es directo, sino que se realiza por medio de estaciones. En la alta velocidad, en la que el tiempo de transporte sólo es competitivo si las estaciones están ampliamente separadas entre sí, el impacto sobre el medio que atraviesa la obra lineal es mayor (pues no existen externalidades positivas). Sin embargo, en la actualidad, el transporte ferroviario está en el centro de los objetivos de la mayor parte de los países europeos en lo que se refiere al desarrollo sostenible y al reequilibrio de modos de transporte.

En este sentido, es necesaria una reflexión mayor en cuanto al diseño de trazados ferroviarios. Se hace imprescindible explotar las ventajas que se derivan de una participación pública eficaz (mayor conocimiento del entorno y construcción de líneas más adaptadas al medio). El objetivo principal de este trabajo es estudiar un caso de infraestructura real en el que para su diseño se llevó a cabo un proceso de participación pública. Posteriormente, se extraen conclusiones que permiten detectar las ventajas de la participación pública integrada en el diseño de trazados ferroviarios, justificando por tanto, la necesidad de poner en práctica estos procesos.

## **2. Método de trabajo**

El método de trabajo que se ha empleado para la realización de este estudio es el “estudio de casos” que se define como una estrategia de investigación cualitativa adecuada “para tratar con una situación técnicamente distintiva en la cual hay muchas más variables de interés que datos” (Yin, 2003). Se dice también que es el método indicado cuando las preguntas a responder en el trabajo de investigación sean del tipo “cómo” o “qué”, el investigador tiene control nulo o escaso sobre los sucesos, esto es, no puede intervenir en el desarrollo del fenómeno ni reproducirlo y se estudian fenómenos en su contexto real. Otros autores (Coller, 2005) definen el estudio del caso como un método empírico que investiga un fenómeno contemporáneo en su contexto real, en el que los límites entre fenómeno y su contexto son difusos y que se considera relevante bien sea para comprobar, ilustrar o construir una teoría o parte de ella. Por estas razones, la estrategia de investigación que se seleccionó para este trabajo corresponde al estudio del caso.

En efecto, el hecho a analizar en su contexto real es el proceso de diseño de una infraestructura ferroviaria en la que se integra la participación pública. La figura siguiente muestra un esquema comparativo entre el proceso de diseño tradicional y el que se somete a análisis.

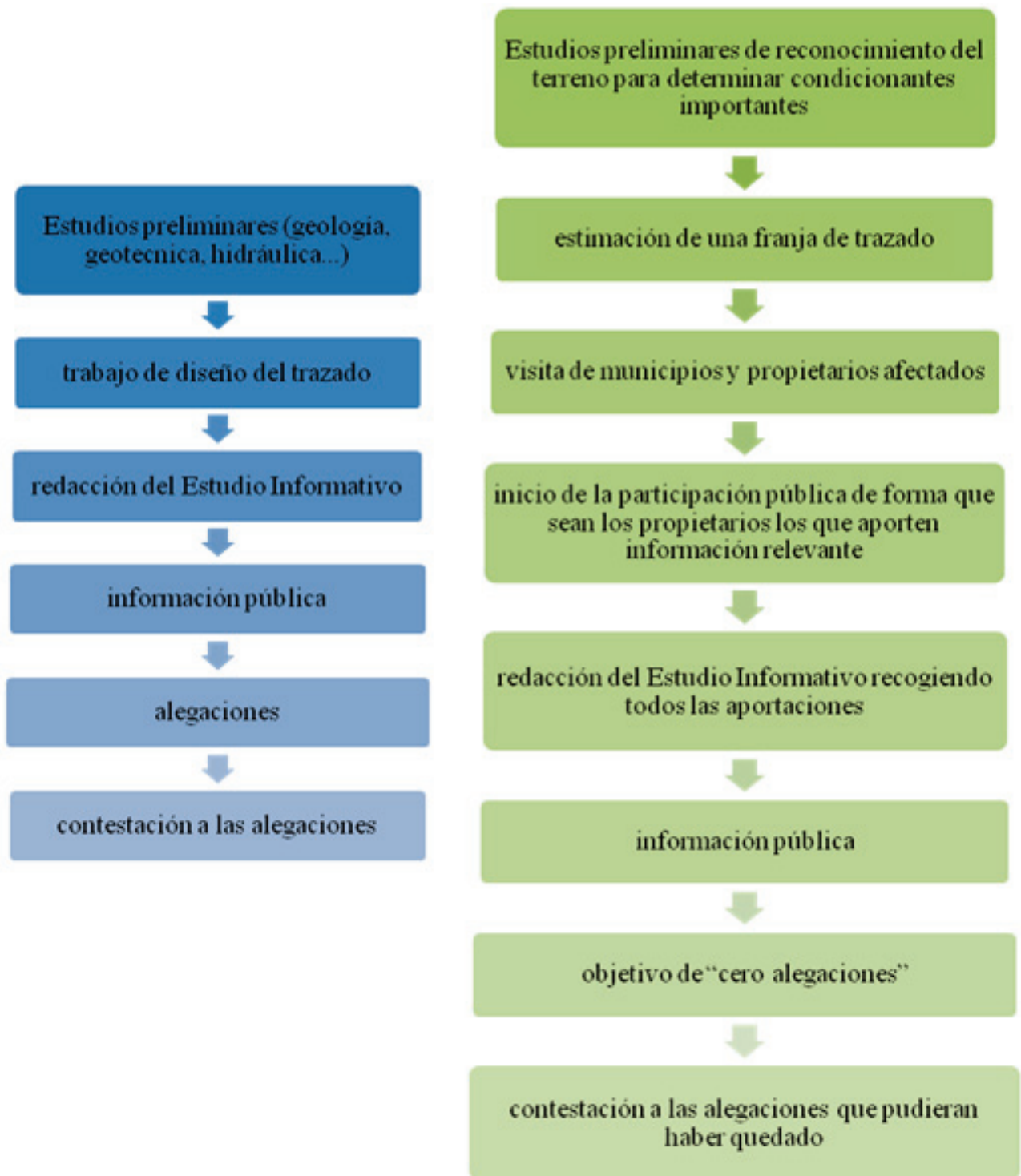


Figura 1. (a) Método actual para el diseño de líneas ferroviarias (b) Diseño de líneas ferroviarias integrando la participación pública (en paralelo)

### 2.1. Elección del caso de estudio

Se decide emplear el proyecto de Línea ferroviaria de Alta Velocidad Poitiers-Limoges (LAV o LGV en francés, Ligne à Grande Vitesse) como un caso de estudio. Empleando el método descrito de investigación cualitativa inductiva se pretendió extraer conclusiones observando cómo se diseñaba una infraestructura que esperaba estar mucho más adaptada al entorno y al modo de vida de los habitantes, mejor integrada medioambientalmente y más aceptada por la población.

La decisión de centrar el trabajo en la LAV Poitiers-Limoges, vino motivada por el conjunto de antecedentes administrativos en los que se inscribía la línea. Así, en 2003, en Francia, el Comité Interministerial de Ordenación y Desarrollo del Territorio inicia el proceso de estudio de la LAV entre Poitiers y Limoges cuya finalidad es asegurar la conexión del centro del país con el eje ferroviario de alta velocidad norte-sur, la llamada LGV SEA: Tours-Burdeos, Burdeos-Toulouse y Burdeos-Frontera Española. Dado el contexto fuertemente rural de la región de la Vienne que cuenta con explotaciones agrícolas de alto potencial, clasificadas como tal, era necesario diseñar un trazado que minimizara las afecciones y la ocupación. Así en 2007, la resolución del Ministro de Transportes francés indica que: “para la organización de los estudios del proyecto de LGV Poitiers – Limoges, RFF deberá poner en práctica un proceso de concertación ciudadana que se desarrollará en paralelo a la fase de estudios preliminares. Dicha concertación deberá realizarse de forma continua mediante intercambio bilateral entre RFF y los diferentes agentes implicados, incluso ciudadanos”.

### 2.2. Entorno y muestra

El estudio del proceso participativo se limitó al tramo situado entre los PK 8+000 y 21+000 de la futura LAV entre Poitiers y Limoges, ésta en su totalidad tiene una longitud total de unos 115 km (longitud variable dependiendo de las alternativas de trazado que fueron definidas). Con objeto de ser más precisos en las observaciones, se decidió focalizar el estudio en 13 km de trazado ferroviario. Eligiendo esta zona de terreno para la observación se pudo analizar en detalle un claro ejemplo donde:

- Se reflejaba el proceso de concertación ciudadana (participación pública integral) que constituía el aspecto más novedoso del proyecto.
- Se reflejaba la importancia de la integración paisajística en una región tan particular como es la Vienne.
- Se dejaba constancia de las actuaciones de protección del medio ambiente, flora y fauna.

La necesidad de tener que atravesar bosques impone la construcción de pasos de fauna y de otras medidas.

La decisión del tramo a estudiar fue realizada en función de varios criterios. El terreno elegido reflejaba las características generales del resto del trazado: localización de pequeñas aldeas o masías aisladas que son el centro de explotaciones ganaderas o agrícolas (La Galanderie, Les Cartes...), localización de grandes masas de árboles (Bois de Vernon) y ubicación de zonas estratégicas para el desarrollo económico y turístico de la región (castillo y dominio turístico de Dienné).

### 2.3. Toma de datos base de la investigación

Tras la elección de la zona de estudio, se procedió a desarrollar la propia investigación consistente en dos fases, en la primera de ellas se aplicó el método observacional y en la segunda la técnica de la consulta de expertos.

El método empleado en la primera fase este estudio es el conocido como “método de verificación observacional” que es aquel que intenta recabar datos de la realidad sin introducir ningún tipo de artificio, sin ejercer un control sobre las variables independientes o sobre los sujetos a estudiar, simplemente observando las conductas que espontáneamente ejecutan los sujetos. Este método es necesario en este caso porque no fue

posible utilizar ni la verificación experimental ni la correlacional, dada la naturaleza innovadora del diseño de la LAV Poitiers-Limoges. La observación que se realizó con este método fue una observación sistemática (asistencia a reuniones de coordinación del proyecto, asistencia a asambleas de participación ciudadana...) realizada semanalmente.

En la segunda fase se aplicó la “consulta de expertos” que es una herramienta de evaluación que consiste en la reunión o en la entrevista de forma separada de un grupo de personas especialistas independientes y reputados en, al menos, uno de los campos concernidos en el tema a evaluar (EuropeAid, 2006). La aplicación de esta técnica permitió precisar las ventajas de este modo de diseñar un trazado ferroviario y detectar una serie de inconvenientes.

Siguiendo las recomendaciones de la bibliografía en materia de selección de expertos, se evaluaron las características que debían cumplir los entendidos en la materia y por ello, fueron elegidos los señores Beck (LAV Rhin-Rhône), Cuccaroni (LAV Est), Zabee (LAV GPSO), Cottenceau y Serey-Eiffel (LAV SEA). Se realizaron dos rondas de entrevistas semiestructuradas que permitieron sentar las bases de la posterior observación del proceso participativo en la LAV Poitiers-Limoges. Según los expertos, los tres grupos de factores relevantes para detectar las ventajas de una participación pública, son: el tiempo empleado para la realización de los estudios, la inserción medioambiental y el nivel de aceptación de la LAV entre la población.

### **3. Resultados de las consultas**

Tras el proceso de observación sistemática se concluyó que, para la implantación de un proceso de participación pública realizado en paralelo al diseño del trazado ferroviario, era necesario:

1. Conocer las condiciones del terreno en el que se va a realizar el proceso de concertación: características de las actividades económicas, características del medio natural, características del medio humano (densidad de edificaciones y de población) y características del medio económico, si las actividades principales de la zona están relacionadas con la agricultura, la ganadería y la silvicultura habrá que analizar la estructura de las propiedades y explotaciones agrícolas que suelen tener formas complejas y son susceptibles de quedarse aisladas.

2. Concertar reuniones con los alcaldes de los municipios afectados con el objeto de compartir e intercambiar información de todos los temas y con el fin de asegurar que el flujo de información se encamina hacia los propietarios involucrados. El objetivo último de estas reuniones es poder tener un contacto directo con las personas afectadas.

3. Inventariar todos los propietarios de terrenos y edificaciones situados en una franja de 200 a 500 metros de los posibles trazados previstos.

4. Establecer el contacto con los propietarios, primeras entrevistas personales.

5. Tomar información relativa a los habitantes del entorno: factores sociológicos (edad y situación familiar de los agricultores), económicos (estimación de la renta y las fuentes de ingresos), familiares (situación de la unidad familiar, número de hijos y edades), características de las fincas (accesos, productividad, tipo de cultivo, características de los compradores, sistema de gestión de la explotación...), características de las viviendas (apoyo para el uso agrícola o ganadero, residencia familiar, segunda residencia o lugar de veraneo). Se recoge también la opinión sobre el trazado de la línea, estimación de las zonas con menos valor, etc.

6. Almacenar la información en una base de datos programada a tal efecto. Esta base de datos asigna una prioridad de concertación según las características de cada unidad familiar. Este sistema se complementa con un SIG actualizado. El objetivo de estos dispositivos era: (a) garantizar el pilotaje y la coordinación de la concertación para recrear el histórico de las peticiones de los vecinos para integrarlas en el diseño del trazado y (b) tener una trazabilidad que permitiera demostrar durante el proceso de información pública que ha habido aportación de la población y que las aportaciones y la información obtenida de la concertación han sido utilizadas para la redacción del Estudio Informativo.

Al final de estos pasos, los técnicos tenían una secuencia:



Figura 2. Secuencia de información obtenida

Con este modo de diseñar el trazado de la línea ferroviaria, se buscaba el objetivo de “cero alegaciones” en la información pública. Las entrevistas a expertos permitieron detectar y desarrollar las ventajas derivadas.

### 3.1. Mayor conocimiento del entorno

Una de las ventajas más importantes de la participación pública es que se adquiere un gran conocimiento del entorno, tanto del medio humano donde la sociología se mezcla con las decisiones técnicas, como del medio natural. La acción de concertación continua obliga a realizar frecuentes visitas al terreno donde los técnicos pueden comprobar la realidad del mismo, se evitan errores en la percepción del territorio, el diálogo puede ayudar a comprender mejor el campo y así diseñar un proyecto que se adapte mejor a las necesidades locales, se limitan los factores de incertidumbre.

### 3.2. Optimización de los trazados

El uso de participación pública durante la fase de diseño de trazados ferroviarios presenta como principal ventaja una optimización de dicho diseño pues gracias a las aportaciones de los ciudadanos se plantean soluciones más ricas, lo que se llama “coproducción”. Para ilustrar esto, se puede comparar el número de alternativas estudiadas en la LGV SEA tramo Angulema-Burdeos con el de la LAV Poitiers-Limoges. En el primer caso, el trazado elegido se fundamentó sólo en los condicionantes ambientales, atendiendo a estos criterios fueron cuatro las alternativas estudiadas. Por contra, en Poitiers-Limoges, los estudios para la elección de la alternativa más ventajosa fueron mucho más completos, gracias a la coproducción entre ciudadanos y técnicos fruto del proceso participativo, se estudiaron diez variantes.



Figura 3. Imágenes durante la fase de observación sistemática tomadas en una reunión de optimización de las alternativas trazado de la LAV Poitiers-Limoges (coproducción del proyecto entre ingenieros y agentes locales)

Además, las continuas reuniones de participación pública obligan a los técnicos a tomar decisiones lógicas y a conocer el porqué de las decisiones que se toman, se limita por tanto, según los expertos, la instrumentalización política.

### *3.3. Diseño del trazado y de sus medidas correctoras*

La participación pública continua permite, como concluyeron los expertos, plantear alternativas de trazado precisas y completas. Se considera que una alternativa de trazado es “precisa y completa” cuando (1) sortea los obstáculos existentes en el medio rural que condicionan el paso de las grandes obras de alta velocidad ferroviaria (2) limita el impacto ambiental y (3) cuando no es posible, prevé medidas de integración paisajística.

Si bien es cierto que no es posible sortear todos los obstáculos, pues con frecuencia quedan zonas de mayor impacto sobre el medio, el proceso de participación pública continua permite conocer el terreno, sus habitantes y sus actividades. A modo de ejemplo, durante el diseño de la LAV Poitiers-Limoges, se mantuvieron conversaciones con aquellos agricultores afectados por el trazado pues la vía fraccionaba las explotaciones agrícolas en dos. Se buscó un diseño de la infraestructura que permitiera una reestructuración parcelaria, a estas personas se les facilitaron los trámites de cambio de propiedad y la negociación con los propietarios colindantes. Esta es una de las medidas que se ponen en práctica para reducir los impactos sobre las propiedades agrícolas (efecto barrera, aislamiento...) y que sólo es posible llevarla a cabo si se tiene un conocimiento del entorno y si hay una interacción con los habitantes.

Además de la limitación del impacto, en muchas ocasiones es necesario añadir medidas de integración paisajística. Durante el proceso de participación pública continua, gracias a la coproducción del proyecto, todas las alternativas que se plantean incluyeron estas medidas de reducción de impacto. Las observaciones llevadas a cabo así como la experiencia de los expertos muestra que los ciudadanos, dado que no conocen la alternativa que será finalmente elegida, prestan especial atención a la integración de cada una de ellas. La intuición les impulsa a “estar preparados” sea cual sea la alternativa elegida.

Para los técnicos, este aspecto tiene ventajas añadidas pues todas las alternativas propuestas tienen medidas de integración ambiental y no se debe esperar hasta la elección final para su definición. Trabajar en paralelo con el diseño del trazado y con la consulta pública de las diferentes alternativas implica entrar en detalle en cada una de las alternativas propuestas.

Esta forma de trabajar implica asegurar la integración ambiental del trazado final evitando (1) carencias en la inserción paisajística de las infraestructuras o (2) realizar grandes esfuerzos para la integración de trazados con fuerte impacto ambiental tras las alegaciones recibidas.

### *3.4. Facilitar la elección*

Trabajar en el diseño del proyecto con aquellos que van a convivir con la futura infraestructura permite tener información de primera mano tanto para el diseño de las alternativas como para su elección. Los técnicos, a la hora de realizar un análisis multicriterio de las distintas alternativas asignarán pesos a los criterios de decisión de forma más razonada y elegirán la alternativa atendiendo a criterios más y mejor fundados.

### *3.5. Comprender la elección*

A la hora de transmitir a los ciudadanos la alternativa elegida, el proceso de diálogo continuo permite, con un discurso sincero y apoyado en razones lógicas, hacer comprender el trabajo del ingeniero y las razones técnicas en que se fundamenta. Las personas que hayan visto que sus propuestas han sido aceptadas están satisfechas y agradecen a los técnicos su trabajo. Las personas cuyas peticiones no han podido tenerse en cuenta comprenderán, con un discurso sincero y razonado, que sus propuestas han sido estudiadas pero no son viables.

El éxito de este enfoque no se basa en aceptar todo lo que los ciudadanos proponen, sino más bien en el establecimiento de un discurso lógico y didáctico que haga que comprendan las decisiones. La experiencia en la LAV Poitiers-Limoges permite concluir que una buena "preparación del terreno" antes de las reuniones con los actores locales (diputados autonómicos, consejeros comarcales, concejales, ciudadanos...) para darse a conocer e identificar correctamente las necesidades de cada uno, es fundamental para que el proyecto sea comprendido.

### 3.6. Desventajas

Sin embargo, los expertos entrevistados también detectaron algunas desventajas de la integración de la participación pública durante la fase de estudios, que merecen ser destacadas.

Un proceso como el que hemos estado describiendo, sólo es viable realizarlo en entornos rurales poco poblados. En el caso de que se quiera poner en marcha en zonas con alta densidad de población, la consulta a las personas puede ser contraproducente pues el equipo de proyecto no podrá atender a todas las personas (si existe alta densidad de población) por ello la gente sentirá una falta de atención, lo cual puede ser frustrante. Esta idea fue apuntada por el Sr. Cottenceau (LGV SEA) y el Sr. Zabée (LGV GPSO).

Otra de las desventajas apuntadas por el experto Serey-Eiffel (LGV SEA), es que este tipo de proceso iterativo (consulta para la toma de datos – elaboración de las alternativas de trazado – discusión de cada alternativa – modificación de las mismas – análisis y decisión) genera estrés entre los ciudadanos residentes en el entorno. El proceso se puede extender, pues la información que se maneja es muy completa y el análisis lento. Esto, según explican los expertos, preocupa a la gente pues pasan meses sin saber qué alternativa será elegida y aumenta el estrés, lo que puede conducir a una fuerte oposición.

El riesgo de la creación de una consulta directa en la que los ciudadanos estén completamente implicados es que puede limitar el margen de maniobra de las fases posteriores (proyecto básico y proyecto de construcción). De cara al público, la dirección de proyecto debe ser precisa, pero no puede comprometerse con que el trazado acordado será el definitivo. Los técnicos, en su discurso deben dejar claro que en esta fase de estudio informativo las alternativas no se diseñan de forma precisa pues hay fases posteriores en las que puede haber cambios.

Por otro lado, los técnicos deben tener presente, y deben por ello transmitir, que una LAV es una infraestructura que constituye un todo, por ello las modificaciones en un punto pueden condicionar el trazado en otro. En el proceso de participación pública se recibirá un gran número de peticiones, así se debe buscar la prioridad en ellas pues si se intentan satisfacer todas (sortear todos los obstáculos) se corre el riesgo de perder calidad (trazados con curvas que limiten la velocidad y con ello la competitividad de los tiempos de viaje o con poco equilibrio de tierras, etc.).

Por último, es necesario saber antes de iniciar un proceso como este, que el trabajo de los técnicos se va a juzgar desde el principio, pues la documentación técnica está accesible permitiendo que la gente tenga información amplia y fiable (es el objetivo de la transparencia deseada. Si no está bien elaborada, los oponentes al proyecto tendrán más fácil el identificar las debilidades de las soluciones y desarrollar contra-argumentos.

## 4. Conclusiones

El análisis de la experiencia vivida en Francia, muestra que es posible explotar las ventajas que se derivan de una participación pública eficaz llevada a cabo en paralelo al diseño de las alternativas de trazado. Se prueba que la información recogida de propietarios y vecinos es rica y de gran utilidad para diseñar infraestructuras con menor impacto para las actividades que se desarrollan en los territorios y con una mayor adaptación por parte de la sociedad.



En el caso de la LAV Poitiers-Limoges, los resultados del proceso de diseño y participación pública permitieron adaptar el trazado del tramo tanto a las las peticiones generales como a las particulares. Por ejemplo, de forma general, se llegó a una alternativa que no impactaba con grandes masas de árboles ni con cotos de caza, que no tenía impactos sobre edificaciones, explotaciones agrícolas ni lugares turísticos y que reducía el impacto sobre el terreno facilitando una reorganización catastral al final del proceso de forma que cada explotación agrícola o ganadera quede solamente a un lado de la infraestructura ferroviaria. Los resultados tienen múltiples ventajas: reducción de reposición de caminos, facilidades a los agricultores, menor perturbación del modo de vida. Si el diseño de la línea se hace desde el principio teniendo en cuenta las necesidades de la gente (expresadas por medio del proceso de concertación) la reestructuración parcelaria será más productiva.

El nivel de precisión en el conocimiento del entorno fue tal que se respondieron satisfactoriamente a peticiones relacionadas con: la situación económica y familiar de los agricultores, la limitación de impactos visuales importantes, la futura reparcelación de terrenos, la mejora de los caminos de paso de ganado, la transparencia hidráulica, entre otros.

Como se muestra en la experiencia piloto de Poitiers-Limoges, integrar la participación pública en el diseño de alternativas implica: conocer las condiciones del terreno en el que se va a realizar el proceso de concertación, concertar reuniones con los afectados y así compartir e intercambiar información de todos los temas, realizar entrevistas personales a la vez que se sigue con la toma de datos convencional (sondeos y catas, topografía...), etc. Con todo ello almacenado en una base de datos programada a tal efecto o un SIG actualizado (que localice la procedencia de las demandas y les de una prioridad) se podrá coordinar el proceso participativo y tener una trazabilidad. Al final de estos pasos, los técnicos tienen datos suficientes procedentes de la participación pública que les permiten plantear alternativas en función de dichos condicionantes.

El objetivo de integrar la participación pública en el diseño es tener un mayor conocimiento del entorno, optimizar los trazados propuestos y sus medidas correctoras, facilitar y hacer comprender la elección y tener “cero alegaciones” en la fase de información pública.

El hecho de facilitar y hacer comprender la elección de la alternativa, debe estar siempre apoyada por explicaciones técnicas, las razones económicas no son suficientes para la opción pública. Siguiendo esta metodología, además de estar más cerca de alcanzar los objetivos europeos de cooperación y compartición en la toma de decisiones, se evitaran procesos de información pública en los que existan más de cincuenta alegaciones como se ha dado en los últimos años en España. Hacer los proyectos más despacio y mejor, más sostenibles.

## **5. Recomendaciones**

Respondiendo al objetivo de este artículo, en este epígrafe se dan unas breves recomendaciones para la puesta en práctica de este procedimiento según la legislación española.

La Ley 39/2003, de 17 de noviembre, del Sector Ferroviario, en su artículo 5. Planificación de infraestructuras ferroviarias integrantes de la Red Ferroviaria de Interés General promulga que para el establecimiento de una línea o tramo de la Red Ferroviaria de Interés General, será precisa la aprobación de un estudio informativo que comprenda el análisis y la definición, tanto geográfica como funcional, de las opciones de trazado, la selección de la alternativa más recomendable como solución propuesta y el estudio de impacto ambiental de las opciones planteadas. Posteriormente, el Ministerio de Fomento remite el estudio informativo a las comunidades autónomas y los municipios que examinan el trazado propuesto durante un mes, es el proceso de audiencia (a las administraciones públicas) y de información pública (a los ciudadanos).

Como se observa, no es obligatoria por ley la consulta hasta que no están todas las alternativas diseñadas y el trazado propuesto. Al margen de estos requerimientos legales, se han probado las ventajas de consultar, de coproducir las alternativas de trazado. Por ello, lo que se propone es que en el “análisis y la definición geográfica” se aplique el método expuesto para determinar los condicionantes de las alternativas de trazado.

En los estudios españoles, las soluciones del trazado vienen fuertemente condicionadas por factores de carácter administrativo (plan estratégico de infraestructuras aprobado), de carácter urbanístico, de carácter ambiental (espacios protegidos o de interés patrimonial), de carácter geotécnico, geomorfológico, hidráulico o técnico (velocidad de proyecto, radios de curvas...). Sin embargo existe el otro tipo de condicionantes, que son impuestos por las perturbaciones ocasionadas por la línea ferroviaria al entorno de vida y a la economía de los habitantes de los municipios. Este tipo de condiciones son fruto del proceso participativo y pueden afectar al diseño de las alternativas tanto desde el punto de vista del propio trazado como desde el punto de vista de la inserción visual y acústica. Los técnicos tendrían que tenerlos en cuenta e incluirlos en el estudio informativo como un anejo más, pues influyen en el diseño.

A modo de ejemplo, en la región Poitou-Charentes por donde pasa la LAV Poitiers-Limoges, la base de la economía reside en las actividades del sector primario (agricultura, ganadería y silvicultura). Así son aspectos que condicionan el trazado (atendiendo a la no perturbación de las actividades económicas) la preservación de las fuentes de empleo de la región, es decir, las explotaciones agrícolas. Por ello, el proceso de participación pública recogió las peticiones de agricultores y ganaderos que constituyeron condicionantes importantes y las incluyó en el estudio informativo como un dato más.

Esto es, se elaboran las alternativas de trazado en cooperación técnicos-afectados, incluyéndolas después en el estudio informativo. Tras esta fase, aplicando la legislación española, éste se sometía a audiencia y consulta públicas. El resultado previsto es que las observaciones realizadas en este trámite que versen sobre la concepción global del trazado sean mínimas, pues las variantes de trazado ya han sido discutidas. La tramitación del expediente de información pública que corresponde al Ministerio de Fomento se convertiría en un trámite destinado a consensuar algunos aspectos, no serviría para formular alegaciones.

Aplicando este procedimiento, igual que se aplica en Francia, se pretende recuperar una de las ventajas fundamentales de la participación pública que es la realización de proyectos de infraestructuras cada vez más adaptadas a su entorno, menos impactantes y más sostenibles.

## Referencias

[1] Directiva 2003/4/CE del parlamento europeo y del consejo de 28 de enero de 2003, relativa al acceso del público a la información medioambiental

[2] Directiva 2003/35/CE del parlamento europeo y del consejo de 26 de mayo de 2003, por la que se establecen medidas para la participación del público en la elaboración de determinados planes y programas relacionados con el medio ambiente

[3] EuropeAid (2006) Evaluation Methods Guidelines of the European Commission Development and Cooperation

[4] Yin R. (2003) Case study research: design and methods. Sage Publications, Londres.

[5] Coller X. (2005) Estudio de casos. Centro de Investigaciones Sociológicas, Madrid.

[6] Desmarais, C. (2007) La concertation dans la conduite de projet. Guide méthodologique. Voiron : Territorial Editions, Collection Dossiers d'Experts.

[7] Fourniau J.M. (1998) Les décisions d'infrastructure soumises au débat public, Métropolis n°106-107. Evaluer et décider dans les transports, pp 71-70

[8] Conraud, T., Vera Morales, L. R., Lina Manjárrez, P. (2009) Propuesta de mejora al proceso de participación ciudadana dentro de la evaluación del impacto ambiental. Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública, Vol. 2 Núm. 4.

[9] Font, J. (2001) Ciudadanos y Decisiones Públicas. Barcelona: Ariel.

[10] Observatorio Internacional de Ciudadanía y Medio Ambiente Sostenible (CIMAS) (2009). Manual de Metodologías participativas. Madrid, CIMAS.

### **Agradecimientos**

En primer lugar quiero dar las gracias a aquellas personas que hicieron posible la realización del proyecto original que fue Mikaël Beck y el equipo de Arcadis de París así como el equipo de dirección de proyecto de Réseau Ferrée de France, sin esos seis meses de trabajo conjunto no hubiera sido posible recopilar toda la información de base. Gracias también a Paul Bouvarel por ponerme en contacto con todos los entrevistados, expertos indiscutibles en materia ferroviaria en un país como Francia, pionero de la alta velocidad.

No menos importante ha sido la gente que, en España, me ha ayudado a crecer en este mundo del tren: Ricardo Insa y su equipo, Amador Candel y Teresa Font.

Por último, me gustaría desde aquí dar las gracias a los presidentes y directores de las cátedras Puerto de Valencia y Vialobra así como de las fundaciones Juan Arizo Serrulla y Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, por los premios con los que galardonaron este trabajo final de carrera. Estos cuatro reconocimientos me han dado fuerza y una motivación extra si cabe para elaborar este artículo.



# Alta velocidad y desarrollo urbano. 30 Años de experiencias

## *High speed and urban development. 30 Years of experiences*

Blanca Dómine Chust\*

*Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 46022, España*

---

### Resumen

El 27 de noviembre de 2011 se cumplen 30 años de la llegada del primer tren de alta velocidad a la estación de Lyon Part Dieu, levantada unos años antes junto con un gran desarrollo urbano. En los años posteriores se han venido desarrollando en muchas ciudades europeas grandes operaciones de remodelación o creación de estaciones adaptadas a los nuevos servicios que han conllevado profundas transformaciones urbanas en sus entornos. El artículo analiza los aspectos esenciales de 10 de estas operaciones, y resalta los complejos procesos de análisis y planificación que han sido fruto de la colaboración entre expertos en ingeniería ferroviaria y del transporte, arquitectos, urbanistas y especialistas en financiación.

Palabras clave: Estación Central, Alta Velocidad, Transporte, Urbanismo, Ciudad.

### Abstract

*27th November 2011 marks the 30th anniversary of the arrival of the first high speed train to Lyon Part Dieu Station, built a few years earlier along with a large urban development. In the following years many European cities have had existing stations remodelled or new ones built, all of them have been adapted to the new services. All this operations have led to profound changes in their surrounding areas. This paper analyzes key aspects of 10 of these operations, and highlights the complex analysis and planning processes as a result of the collaboration among rail and transport engineering experts, architects, urban planners and finance specialists.*

*Keywords: Main station, High Speed, Transport, Urban planning, City.*

---

## 1. Introducción

El desarrollo de la ingeniería ferroviaria en las últimas cuatro décadas ha sido uno de los elementos claves en la implantación de la red de alta velocidad europea. Este esfuerzo ha conllevado importantes innovaciones en infraestructura, superestructura, electrificación, señalización, grandes obras de fábrica, medidas de restauración ambiental y otros elementos, dando lugar a un amplio abanico de experiencias que han tenido amplio reflejo en la literatura técnica.

Pero además de los avances técnicos en relación con los elementos que podríamos denominar puramente ferroviarios el desarrollo de la citada red ha requerido también una gigantesca labor de adecuación del sistema de estaciones de las ciudades europeas integradas en ella a las nuevas necesidades. Y cuando hablamos de adecuación no estamos hablando tan solo de los requerimientos específicos asociados al nuevo tipo de servicios y al incremento de la demanda, sino también a un cambio radical de todo el ciclo de atención al viajero, reforzando elementos tales como la intermodalidad, los usos comerciales complementarios y la atención específica a viajeros preferentes. A esta necesidad de adecuar el sistema de estaciones se le añadió en muchos casos la de remodelar las redes ferroviarias metropolitanas, dando lugar a una serie de operaciones de gran magnitud y elevado coste.

\*Email autor de contacto: [bladochu@upv.es](mailto:bladochu@upv.es)

En paralelo, la llegada de la alta velocidad ha supuesto una enorme posibilidad de regeneración urbana y de impulso y progreso de las ciudades beneficiadas. En todos los casos se ha valorado como una oportunidad de desarrollo para el conjunto de los espacios metropolitanos atendidos. Y además como una posible fuente de ingresos que, mediante procedimientos muy variados, compensen de manera directa o indirecta las inversiones requeridas.

Las operaciones que con los condicionantes señalados han venido desarrollándose en diversos países europeos constituyen un interesante ejemplo de interrelación entre el sistema de transportes y la dinámica urbana y territorial. Y consecuentemente, un proceso en donde, tanto en la fase de planificación como en el posterior análisis, han venido empleándose metodologías de trabajo que integran aspectos propios de disciplinas que van desde la ingeniería ferroviaria en sentido estricto a la planificación urbana. En este marco, han venido colaborando fructíferamente y lo siguen haciendo ingenieros, urbanistas, arquitectos, economistas y especialistas en derecho para poder llevar a buen fin operaciones que sin duda supondrán un hito en la historia urbana de cada metrópoli implicada semejante al que supuso medio siglo atrás la llegada de los primeros ferrocarriles.

En estos momentos ya ha pasado un tiempo suficiente como para poder abordar todo este fenómeno desde un enfoque global. La primera línea de alta velocidad se pone en marcha como es bien conocido hace ahora 30 años, el día 27 de noviembre de 1981, entre París y Lyon dentro de una operación en la que ya aparecen todos los elementos de complejidad antes comentados. Y desde ese momento, un número no pequeño de operaciones han ido concluyéndose, a la vez que otras tantas se han situado en un grado avanzado de desarrollo. De cada operación podemos encontrar análisis concretos y específicos pero se carece aún de una gama suficientemente amplia de enfoques que los estudien globalmente, y que aborden las interesantes interrelaciones entre todos los elementos que la conforman. En este panorama se debe de exceptuar una serie de estudios de expertos nucleados entorno a la universidad de Delf (Bertolini y Spit, 1998; Trip, 2007) que son una base excelente para proseguir el análisis comparativo antes señalado.

## **2. Metodología de estudio**

Tras una primera selección se han escogido 10 casos que desde nuestro punto de vista permiten abarcar todo el amplio abanico de escenarios de transformación de las estaciones centrales y sus entornos urbanos en relación con la llegada de la alta velocidad. Los ejemplos seleccionados van desde metrópolis de primer nivel (Estación de St. Pancras en Londres, Nueva Estación Central de Berlín) hasta ciudades que pueden considerarse pequeñas a escala europea como son Lille, Bolonia o Florencia. Incluyen por otra parte casos en donde se ha hecho un magnífico esfuerzo de renovación y ampliación de estaciones tradicionales (la de St. Pancras antes mencionada, o la de Marsella St. Charles o Amberes) junto con aquellos en que se ha optado por la construcción de nuevos edificios (Lille Europe, Florencia Belfiore...).

Entre los casos analizados los hay desde los que se circunscriben únicamente a renovación del espacio ferroviario (Bolonia) hasta los que conllevan planteamientos urbanísticos que abarcan entornos muy amplios de las estaciones (Lille, Marsella). Por último, el abanico analizado incluye desde operaciones que pueden considerarse totalmente terminadas hasta algunas que están en una fase inicial (Valencia), pasando por aquellas que si bien se estimaban como concluidas el éxito del modelo urbano generado ha aconsejado la puesta en marcha de una segunda fase (Lille).

Con estos antecedentes se ha procedido a identificar cuales son los elementos esenciales de las 10 operaciones más interesantes abordadas en Europa en los últimos 30 años, analizando los aspectos comunes de todas ellas y la interrelación que se advierte en las diversas soluciones que se han ido adoptando.

Se puede avanzar como resultado final, la persistencia de una serie de criterios y soluciones básicas que se reproducen más allá de las peculiaridades de cada entorno. Y también como se ha venido produciendo una mutua influencia entre los procedimientos de análisis y planificación de manera que la experiencia de cada actuación ha servido provechosamente a las ulteriores.

### 3. Casos analizados

#### 3.1. Lyon

Conviene comenzar el análisis por el primer servicio de alta velocidad que se implanta en Europa entre París y Lyon, en septiembre del año 1981 y en la interesante operación urbana que acompaña la implantación de la nueva estación en la ciudad del Ródano. Además de ser el primero, es un ejemplo sumamente interesante ya que los aspectos territoriales y urbanísticos estuvieron presentes desde el principio, siendo incluso determinantes a la hora de decidir esta gran inversión. En los años 70 y 80 del pasado siglo, el gobierno francés desarrollaba una política de reequilibrio territorial cuyo objetivo básico era compensar el crecimiento desmedido de la región metropolitana de París. Por otra parte, la aglomeración de Lyon, polo esencial de esta estrategia, había planteado a su vez reconvertir unos amplios espacios que habían dejado vacantes instalaciones militares y ferroviarias en un gran polo de actividad. Surge así la idea de la nueva estación de Lyon Part Dieu y de un gran desarrollo urbano en su entorno como elemento clave para convertir a Lyon en un contrapeso a la capital del país. Medio siglo después de que comenzará el proyecto debemos valorarlo como un eslabón imprescindible para comprender el nuevo papel que puede jugar la llegada de la alta velocidad en relación con la satisfacción de objetivos territoriales y urbanos.

Lyon Part Dieu se proyecta como una estación pasante ubicada en una zona de gran centralidad y perfectamente conectada con el sistema de transporte público. A la vez surge en su entorno un nuevo barrio con 1,6 millones de metros cuadrados de usos residenciales y terciarios. De hecho, todo el proyecto se había fraguado desde finales de los años 50 antes de que se decidiera la implantación de los servicios de alta velocidad, si bien el nuevo concepto de servicio ferroviario estuvo presente tanto en la última fase de planificación urbana como en su implementación. El balance presenta elementos positivos: éxito financiero a largo plazo de la operación, comercialización de todo el suelo disponible, generación de una gran cantidad de puestos de trabajo, tremendo crecimiento de los flujos ferroviarios, etc. Pero también sombras: no se ha podido conseguir radicar allí un número significativo de sedes de empresas, y como señalan algunos de los impulsores del proyecto inicial, las morfologías utilizadas (que prescinden del concepto tradicional de la calle) no crean espacios de calidad (Autran, 2008).

#### 3.2. Lille

Los criterios de la operación Lyon Part Dieu condicionaron el enfoque de la que se desarrolló unos años después en Lille (Euralille). En este caso se opta por mantener la antigua estación de Lille Flandre para servicios convencionales, creando junto a ella una nueva (Lille Europe) pasante para los servicios de alta velocidad París-Londres. El objetivo último era convertir la llegada de la alta velocidad en un revulsivo para que la principal ciudad del norte francés superara una etapa de gran depresión provocada por el colapso de los sectores productivos tradicionales. Se confió en el innovador arquitecto holandés Rem Koolhaas la redacción del master plan del entorno: un revolucionario concepto respecto a la tradición urbanística tradicional que contemplaba un alto nivel de integración de usos y dos grandes torres en régimen de derecho de vuelo sobre la propia estación y que en su entorno preveía 1,6 millones de metro cuadrados de terciario y 40.000 empleos.

La operación Euralille tuvo que superar ciclos de crisis inmobiliaria y otros obstáculos, es hoy quizá el mejor ejemplo del que disponemos desde el punto de vista ferroviario y urbanístico. Junto con otras acciones simultáneas ha logrado resituar a la ciudad como motor de crecimiento de una amplia región que incluye zonas del norte de Francia y del sur de Bélgica.



Fig. 1. Estación de Lille Europe y sobre ella la torre de Christian de Portzamparc

Los analistas tienden a evaluar la operación Euralille como el ejemplo clásico de perfecta compaginación entre los componentes ferroviarios y funcionales y los objetivos urbanísticos y territoriales (Trip, 2007). Igualmente, su fórmula de gestión (una sociedad de economía mixta, SAEM, que aún hoy prosigue su desarrollo de la segunda fase) es considerado un ejemplo de éxito, cuyos criterios básicos influyeron en las que fueron desarrollándose posteriormente tanto en la propia Francia como en otros países.

### 3.3. Marsella

Así por ejemplo, cuando se plantea la necesidad de remodelar la red arterial ferroviaria de Marsella para que acoja la llegada de los servicios de alta velocidad provenientes de París y Lyon se pone en marcha una operación cuyos criterios básicos son semejantes a los que hemos visto en los casos de Lyon y Lille.

Por una parte, se preserva la centralidad de la antigua estación de Marsella St. Charles como elemento de revitalización del centro tradicional de la ciudad. En segundo lugar se acomete una importante inversión en la estación propiamente dicha si bien es cierto que, en este caso, rehabilitando de una manera magnífica el viejo edificio y ampliándolo, para satisfacer las nuevas necesidades. En tercer lugar, también aquí se plantea una gran operación urbana (Euromeditarrene) destinada a ordenar 120.000 metros cuadrados en el entorno de la estación, destinados a albergar usos residenciales y actividades que aprovechen los nuevos potenciales vinculados al incremento de accesibilidad asociado a los servicios. No obstante, a diferencia de Lille, el sistema de gestión no es una SAEM, sino un consorcio con fuerte apoyo estatal.

En estos momentos, la estación Marsella St. Charles así transformada ha recuperado su antiguo esplendor, es un importante foco de actividad urbana y satisface plenamente los requerimientos funcionales planteados. Por otra parte, el grado de desarrollo de la operación Euromeditarrene aún es insuficiente para poder valorar sus resultados.

### 3.4. Amberes

A poco más de 100 km de Lille, en el norte de Bélgica, Amberes acomete la transformación de su red ferroviaria con motivo de la implantación de la línea de alta velocidad Bruselas-Ámsterdam. Lo esencial era compaginar la centralidad de la estación de alta velocidad con el carácter necesariamente pasante de la línea. Para ello se acomete la titánica tarea de reconvertir el antiguo edificio de Louis Delacenserie puesto en servicio



en 1905, que para muchos es considerado el mejor ejemplo de la arquitectura ferroviaria del siglo XX en Europa, mediante un proyecto sumamente complejo que incluye sustituir el antiguo nivel único de vías por tres niveles diferenciados y solventar el paso del túnel pasante bajo el antiguo edificio mediante una atrevida solución geotécnica. También aquí se plantea el objetivo de potenciar los usos relacionados con la estación así remodelada mediante un desarrollo urbano generado junto al nuevo vestíbulo sur (Kievitplain)



Fig. 2. (a) Nuevo vestíbulo sur de la estación y desarrollos urbanos anejos (b) Edificios de oficinas y hoteles junto al acceso sur de la estación.

Con unas disponibilidades de espacio muy inferiores a las de los ejemplos anteriores, los resultados han sido igualmente brillantes en términos tanto de eficiencia del sistema ferroviario como de potenciación del centro de la ciudad de Amberes.

### 3.5. Berlín

En el caso de Berlín, los objetivos urbanos y territoriales eran de una magnitud mucho mayor que en los cuatro ejemplos precedentes. La nueva estación central de Berlín (Berlin Hauptbahnhof) debía de ser el nudo que articulase el sistema ferroviario centroeuropeo y además un eslabón esencial tanto en lo funcional como en lo conceptual del nuevo centro de la capital alemana. Para ello, se decide aprovechar un espacio vacante proveniente de la antigua estación de Lehrte, destruida en la Segunda Guerra Mundial a escasos metros del Reichstag. El objetivo se consiguió mediante un impresionante edificio del arquitecto hamburgués Meinhard Von Gerkan, que conjuga perfectamente la funcionalidad prácticamente perfecta del intercambio modal con la reproducción de la morfología típicamente ferroviaria de la bóveda, pero en este caso con el uso casi exclusivo del cristal en la cubierta.

El desarrollo anejo de 600.000 metros cuadrados, destinado a albergar usos que aprovechen la nueva centralidad, está ahora en fase de gestión. Su nombre, Europacity, pone de manifiesto la influencia que en este tipo de operaciones ha tenido la de Lille. El sistema empleado para su impulso es una concesión a una sociedad privada.

### 3.6. Stuttgart

Todas las operaciones antes comentadas tuvieron en su fase de planificación y concertación amplísimos respaldos en la opinión ciudadana que las percibían de una manera muy positiva. Sin embargo, a principio del presente siglo se han acentuado los movimientos discrepantes con las grandes actuaciones tanto por cuestiones ambientales y de respeto por con el patrimonio arquitectónico como de eficiencia económica. La operación planteada en Stuttgart (Stuttgart21) es sin duda impecable desde el punto de vista ferroviario, arquitectónico y urbano. Se preserva el viejo edificio, una excelente muestra de la arquitectura de los años 20 obra de Bonat y Scholer, sustituyendo el haz de vías en fondo de saco por otro transversal subterráneo. En la cola de la estación los espacios ferroviarios obsoletos se sustituirían por un desarrollo urbano de 100 Ha con parques, 11.000 apartamentos y 20.000 puestos de trabajo.

La operación que actualmente sigue en marcha ha sido objeto de serias modificaciones tras las presiones de la opinión pública, incluso materializadas en grandes manifestaciones que cuestionaban la eficiencia económica de la inversión y exigían niveles aún mayores de respeto a edificio en principio secundarios del complejo ferroviario. El caso de Stuttgart21 pone de manifiesto la importancia de incorporar a las cuestiones técnicas, ya sean funcionales o urbanísticas el papel cada vez mas relvante de los diversos agentes sociales (Trip, 2007).

### 3.7. Florencia

Italia planteó el desarrollo de sus servicios de alta velocidad aprovechando inicialmente las estaciones preexites, pero sin olvidar que debía afrontarse en un plazo corto una reforma sustancial de los enlaces ferroviarios y de las instalaciones al servicio de los viajeros. Además, el papel de los agentes sociales antes señalados fue particularmente explícito en el caso italiano de cara a exigir que los nuevos servicios de alta velocidad fueran acompañados de la potenciación de los metropolitanos y regionales. Por ello, tales modificaciones incorporaron desde el principio los requisitos necesarios para incrementar estos servicios convencionales.

Así ha sucedido en el caso de Florencia. Los servicios de alta velocidad Roma-Bolonia-Milán recalcan actualmente en la estación de Santa María Novella, que tiene una disposición en fondo de saco, lo que perjudica la eficiencia de tales servicios. Además agota las posibilidades de atención a los convencionales. La solución que dada al problema permite detectar los criterios básicos detectados en las operaciones anteriormente comentadas.

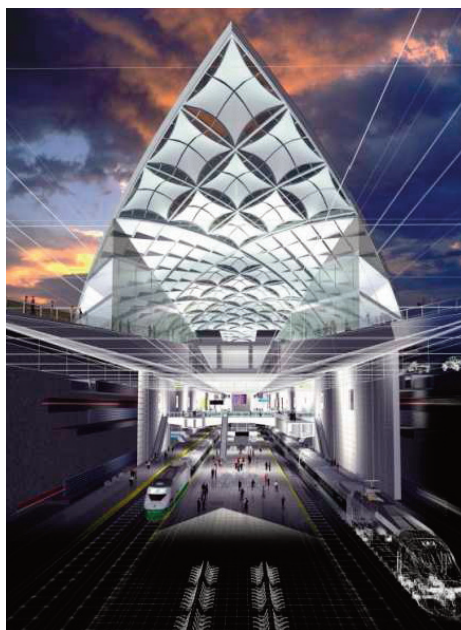


Fig. 3. Propuesta de Foster para la nueva estación Florencia Belfiore

Como en el caso de Lille, se decide mantener los servicios convencionales en la antigua estación en fondo de saco construyendo una nueva estación pasante muy próxima, Belfiore. La relevancia arquitectónica del nuevo edificio es un objetivo central como vimos anteriormente en los casos de la propia Lille o de Berlín. En este caso son los acreditados despachos de Foster y Ove Arup los encargados de diseñar un magnífico edificio que recrea la tipología de marquesina bóveda con materiales de alta tecnología teniendo además en cuenta un nuevo factor que pasa a ser prevalente, como es la sostenibilidad y la eficiencia energética. Igualmente se valora la conveniencia de introducir usos lucrativos adicionales pese a la escasez de la superficie bruta disponible como se ha visto en el caso de Amberes.

### *3.8. Bolonia*

En Bolonia, como en Florencia, la operación de reconversión de la estación se está llevando a cabo después de la llegada de la alta velocidad, en diciembre de 2009 con motivo de la implantación de los servicios Roma Bolonia que luego serían extendidos a Milán y Turín. La playa de vías actual es pasante pero con un altísimo nivel de saturación que impide el progreso de los servicios regionales. Para solventar este problema se desdobra en dos: una al nivel de la ciudad para servicios convencionales y una segunda ubicada a 23m de profundidad bajo la anterior engarzada en un túnel pasante especializado en alta velocidad.

Se cumplen así los objetivos de mantenimiento de la centralidad, intermodalidad e incremento de la capacidad ferroviaria para los servicios de corta y media distancia. Como en el caso de Florencia, un nuevo volumen de 172.000 m<sup>2</sup> con un cuidado diseño del arquitecto japonés Arata Isozaki culminará la actuación.

### *3.9. Londres*

Todas las operaciones fraguadas a finales del pasado siglo tenían como denominador común el papel protagónico de las administraciones y dentro de él el de la entidad pública responsable de la infraestructura ferroviaria en cada país. La operación de convertir la vieja estación de St. Pancras en el punto de llegada de los servicios de alta velocidad en Londres se enfoca en una etapa en donde ya empezaban a escasear los recursos públicos, especialmente para actuaciones de gran magnitud como las que estamos analizando. El sistema de participación público privada en la gestión de infraestructuras ferroviarias que en Reino Unido ya venía siendo el habitual desde hacía tres décadas, suponía una alternativa para conseguir los objetivos deseados en el plazo más breve posible.

En consecuencia, se opta por un modelo concesional: la entidad LCR (London and Continental Railways) que a partir de 2006 estuvo integrado por una serie de empresas constructoras y financieras tales como Bechtel, Arup, el grupo National Express y otras. Este modelo, que sí bien tuvo que ser revisado en sus aspectos financieros y societarios, ha demostrado un alto grado de eficiencia tanto por la rapidez en que se ha desarrollado el ciclo de inversión como por los resultados obtenidos en términos funcionales, de generación de actividad y de recuperación del patrimonio arquitectónico.

La esencia de la sostenibilidad implica respetar lo preexistente que sea valorable adaptándolo a las nuevas necesidades de los ciudadanos. El fantástico edificio de la estación de St. Pancras construido en 1865 y la impresionante marquesina aneja de Barlow, uno de los elementos cumbres más destacables de la ingeniería ferroviaria del XIX, dan cobijo hoy en día a la línea de alta velocidad que une Londres con el continente y a un centro comercial que se ha convertido en uno de los principales focos de actividad de la capital británica. La intervención conjuga una perfecta adaptación a las nuevas funcionalidades con el respeto y la valorización de todos los elementos arquitectónicos preexistentes.

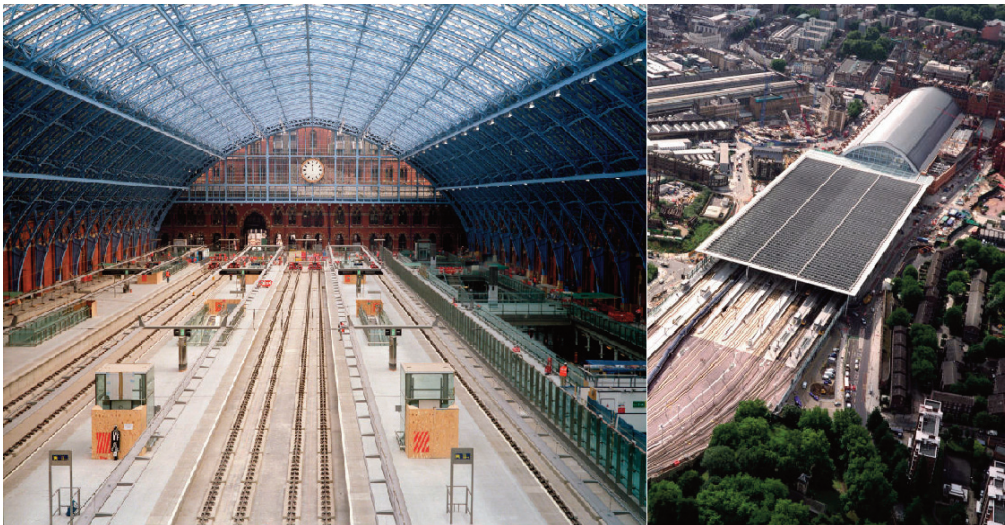


Fig. 4. (a) Londres St. Pancras. La marquesina de Barlow de 1863 albergando los servicios de alta velocidad; (b) Extensión de la marquesina

El ejemplo de St. Pancras permite además comentar la importancia que para el éxito de todas estas operaciones debe tener la intermodalidad entre los servicios de alta velocidad y el sistema metropolitano de transportes. En la medida que tales conexiones sean eficientes, lograremos que las ventajas de los nuevos servicios ferroviarios alcancen a todos los ciudadanos de los ámbitos metropolitanos y en consecuencia se apoyarán procesos de desarrollo urbano que vayan mucho más allá del entorno inmediato de la estación. En esta materia, la remodelación de la estación de St. Pancras es también uno de los mejores ejemplos que podemos encontrar en Europa, con elementos tan interesantes como la reforma sustancial de la línea Thames Link, eje vertebrador norte-sur del sistema de transporte público londinense y que ahora, tras la conclusión de una variante ferroviaria subterránea recala a tan solo unas decenas de metros de los servicios de alta velocidad.

### 3.10. Valencia

Todos los objetivos, criterios de diseño y condicionantes observados en los diversos ejemplos comentados anteriormente han condicionado las soluciones adoptadas en nuestro país. En el caso de Valencia, por ejemplo, se opta como en todos los restantes, por mantener la centralidad de la estación, recuperando y reutilizando el magnífico edificio modernista del arquitecto Demetrio Ribes que da servicio a la ciudad desde los años 20 del pasado siglo. Para ello se opta por una solución a dos niveles (semejante a la que ya veíamos en casos como Amberes y Bolonia) pero en este caso ambos subterráneos. El nivel especializado en alta velocidad ubicado a 23 metros bajo el nivel de calle forma parte del túnel pasante que en su día atravesará la urbe de norte a sur. La intermodalidad se ha cuidado especialmente con la integración en el complejo de dos estaciones de la red metropolitana. Por otra parte, como en la mayor parte de los casos anteriormente analizados la actuación se completa con una operación urbanística, esencial por otra parte para asegurar la financiación, que incluye un gran parque (cuyo diseño ha sido adjudicado a la famosa paisajista Kathryn Gustafson) y diversos usos comerciales y residenciales.

No obstante, se debe señalar que las operaciones emprendidas en España, y entre ellas la de Valencia, añaden un objetivo adicional que no estaba presente en el resto de los casos europeos analizados: el tratar de resolver además el soterramiento de la red convencional que en todas las ciudades francesas, alemanas, italianas, belgas, holandesas y británicas vistas anteriormente, seguía estando, al menos parcialmente, al nivel de la ciudad o sobreelevado respecto a este. Este requisito añade complejidad técnica y financiera a las actuaciones, y sin duda tiene que ver con modelos urbanos diferentes.



Fig .5. (a) Proyecto ganador de la paisajista Kathryn Gustafson.; (b) Vista del anfiteatro que incluye el nuevo espacio

#### 4. Conclusiones

El análisis de las operaciones antes relatadas permite constatar la existencia de una serie de elementos comunes que persisten con independencia de que se hable de escenarios diferentes desde muchos puntos de vista que van desde la distribución de las competencias administrativas hasta la tradición urbanística pasando por el papel histórico asignado al ferrocarril en la movilidad de los ciudadanos o los niveles de calidad urbana.

Salvando estas diferencias, son puntos comunes los siguientes:

a. La estación debe seguir siendo un elemento de centralidad urbana y por lo tanto su ubicación natural es el centro urbano en sentido estricto de forma que este vinculada de manera directa a las funciones comerciales, administrativas y de interrelación que tales centros desarrollan. El 100% de los casos analizados cumplen este criterio.

b. En casi todos los casos la cuestión esencial desde el punto de vista ferroviario se ha planteado en términos de capacidad, de la propia estación y de los accesos y en relación con que los servicios sean pasantes. Solamente Londres, por su condición de punto final de recorrido, y Marsella, por su ubicación geográfica han optado por mantener a largo plazo su condición en fondo de saco. El número de vías en las estaciones pasantes es muy variable dependiendo de los servicios a atender y las disponibilidades de espacio, y van desde tan solo cuatro (Florencia Belfiore) a las dieciséis de Berlín. En solo dos casos (Stuttgart y Valencia) las playas de vías son totalmente subterráneas.

c. Los nuevos servicios requieren un incremento sustancial de las instalaciones al servicio de los viajeros, y una mejora cualitativa para adaptarlos a un nivel de demanda homologable al de la red aeroportuaria. En la mayor parte de los casos (seis de los diez analizados) se ha optado por la recuperación/ rehabilitación de las estaciones preexistentes, dando un excelente ejemplo en el marco de las políticas urbanas que priorizan la rehabilitación. Fruto de ello son ejemplos tan apreciables como los de Londres (St. Pancras), Marsella (St. Charles) o Amberes. En dos casos se mantiene la estación antigua, levantando en la proximidad una nueva, y en los dos restantes (Lyon y Berlín) se construyen nuevas estaciones aprovechando vacíos preexistentes.

d. En los casos en donde se ha requerido nuevos edificios la decisión unánime ha sido entenderlos como hitos esenciales de la percepción de la ciudad y por lo tanto recurrir a las mejores arquitecturas posibles que van desde la espectacular Florencia- Belfiore de Foster, a la de Hauptbahnhof de Berlín de Meinhard von Gerkan, pasando por el trabajo de Koolhaas en Lille y el de Isozaki en Bolon

e. Los nuevos servicios de alta velocidad son capaces de convertir la propia estación en el centro comercial y de servicios de referencia de cada una de las ciudades, generando unos ingresos adicionales importantísimos para la financiación de las actuaciones a la vez que se favorece un modelo urbano en el que el transporte público es un modelo urbano centrado en el transporte público. La estación de St. Pancras ha pasado a tener más visitantes por motivos comerciales que por los servicios ferroviarios, el entorno de la estación de Lille atiende un mercado que supera los límites nacionales e igualmente las futuras estaciones de Bolonia y Florencia prevén cantidades inherentes de metros cuadrados comerciales. Todas las operaciones incluyen un importante incremento de usos comerciales en la propia estación, salvo en el caso de Lille en donde solo se encuentran en el entorno.

f. La intermodalidad está en la esencia del buen diseño de las nuevas estaciones, favoreciendo tanto la minimización de los tiempos en transporte público como la atractividad de su entorno. La nueva estación de Berlín puede decirse que es la plasmación del principio de intermodalidad entre los dos grandes ejes ferroviarios de dicha metrópoli mientras que a veces se desarrollan actuaciones tan potentes como el desvío del eje norte sur de la ciudad de Londres para ubicarlo a pocos metros de los servicios de alta velocidad. La totalidad de las operaciones mejora sustancialmente la conexión con otros servicios ferroviarios, siete de ellas tienen potentes intercambiadores con la red de metro y tres con la red tranviaria.

g. Los efectos de promoción de actividades residenciales o comerciales y por lo tanto, de la generación de recursos, suelen extenderse por ámbitos de mucha entidad que requieren una ordenación específica novedosa. Desde Lyon Part Dieu hasta el futuro distrito de Parque Central en Valencia hay todo un abanico de modelos de nuevo urbanismo ligados a las operaciones ferroviarias. Ocho operaciones plantean ese tipo de desarrollo, y en las dos que no es posible por la carencia de nuevos espacios a ordenar (Florencia y Bolonia) se priman especialmente los usos terciarios en las propias estaciones.

Las nuevas ordenaciones favorecen la generación de actividad y de usos residenciales frente al sistema de espacios libres. Solamente en el caso de Valencia se diseña un gran parque de cerca de 25 Ha en el centro mismo de la operación, siendo en los restantes casos elementos que podíamos llamar secundarios de los nuevos desarrollos urbanos.

Siempre se opta por un modelo de ordenación integrado con presencia de usos comerciales, terciarios y residenciales. En tres de los casos los usos administrativos (Lille, Amberes y Stuttgart) cobran un papel relevante aprovechando la centralidad a nivel regional para emplazar servicios a los ciudadanos de las respectivas ciudades circundantes.

h. Estamos hablando siempre de actuaciones de gran complejidad. A diferencia de las inversiones ferroviarias tradicionales exigen el concurso de especialistas en áreas que van desde la ingeniería ferroviaria hasta el urbanismo, pasando por la arquitectura y la consultoría relacionada con la financiación de proyectos. Y por descontado la complejidad abarca a las relaciones institucionales entre las distintas administraciones competentes. La complejidad, la necesidad de concertación y el esfuerzo financiero conllevan casi siempre ciclos de inversión de dos décadas. En concreto, solo podemos hablar de menos de una década en dos de las operaciones, y cuatro de ellas se han extendido en su fase de gestión e implementación más de quince años.

La interrelación entre elementos clave del sistema de transporte como son las grandes estaciones y sus entornos inmediatos configuran un campo de análisis sin duda apasionante. La adopción de soluciones eficientes puede conllevar importantes beneficios tanto desde el punto de vista de la explotación ferroviaria como del potencial de crecimiento de los entornos urbanos en los que se ubican. En las últimas décadas se han podido ver una serie de interesantes actuaciones jalonadas en muchos casos por el éxito. Se ha podido comprobar además que detrás de ellas hay muchos elementos comunes que trascienden la diversidad de los entornos en los que se desarrolla. Su análisis comparativo y la profundización en cada una de ellas puede ser sin duda una interesante ayuda para perfilar las operaciones del mismo tipo que el futuro se desarrollen.

## Referencias

- [1] Autran, S. La superficie du centre commercial est passé de 30.000m<sup>2</sup> dans les plans initiaux à 40.000 m<sup>2</sup> puis à 120.000 m<sup>2</sup>! Louis Pradel était convaincu que c'était un moyen de financement intéressant...(2008) Millénaire. Le Centre Ressources Perspectives du Grand Lyon.
- [2] Autran, S. Le quartier de la Part-Dieu à Lyon : l'invention d'un centre-ville 1960 – 1980 (2008) Synthèse. Les premières réflexions urbaines imaginées pour le quartier de la Part-Dieu.
- [3] Bertolini, L. Spit, T. (1998). Cities on rails: redevelopment of railway stations areas. E & FN Spon
- [4] Bruinsma, F. et al. (2008) Railway Development: Impacts on Urban Dynamics. Physica-Verlag, Heidelberg
- [5] Comisión Europea. (2010) EUROPA 2020. Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador. Comisión Europea. Bruselas.
- [6] Comisión Europea. (2011) Libro Blanco. Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible. Comisión Europea. Bruselas.
- [7] Delpont, A. (2002) The case of Lille- Eupope/Euralille. Urban land institute-Airport and rail centres.
- [8] Dittmar, H. et al. (2004) The New Transit Town: best practices in transit- oriented development. Island Press.
- [9] Duthilleul, J. M. (1994) La experiencia francesa de integración urbana. Sesión: Elementos de integración: estaciones y accesos. Seminario Integración del Ferrocarril en el Medio Urbano. Madrid. Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- [10] Enver, F. (2010) Bologne, La future des TCSP. Villerail & Transports. Francia.
- [11] Geurs. K. (2006) Accessibility, Land Use and Transport: accessibility evaluation of land-use and transport development and policy strategies. Eburon Uitgeverij B.V. Delft
- [12] Laval, P. (2010) Stuttgart, le quartier de la gare entre projet et polémique. Villerail & Transports. N°506. Francia
- [13] Leo Van den Berg, P. (1998) The European high-speed trainnetwork and urban development. Experiences in fourteen European urban regions. Ashgate. Inglaterra
- [14] Mannone, V. (1997) Gares tgv et nouvelles dynamiques urbaines en centre ville : le cas des villes desservies par le tgv sud-est. U.f.r. de Geographie d'aix-en-Provence. Les Cahiers Scientifiques du Transport. Francia
- [15] Meneraultm, Ph. et al. (2001) Gares et quartiers de gares: signes et marges. Inrets, coll. Actes, Francia
- [16] Smart, T. (2010) Estación de St. Pancrás. Jornada: Grandes estaciones del siglo XXI. Reinventando el centro de la ciudad. Generalitat Valenciana .Consellería de Infraestructuras y Transporte y Cátedra Demetrio Ribes
- [17] Trip, J.J. The case of high-speed train station area redevelopment. Delft University of Technology. Haveka, Alblasserdam.
- [18] Venhoeven, T. et al. (2010) Station centraal. Over het samenbinden van station en stad. Rob van der Bijl. Holanda.





# Lomotora Naval 1322 de FEVE. Reforma, funcionamiento, prestaciones

## *FEVE's Naval Locomotive 1322. Alteration, operation and performance*

Francisco Barberly Tortosa\*

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III, Madrid, 28911, Madrid*

---

### Resumen

El artículo describe las diferentes fases de la reforma completa de una locomotora de maniobras diésel de vía métrica del año 1966. También explica de forma general el funcionamiento del vehículo ya reformado y expone sus nuevos parámetros de funcionamiento, indicando los conceptos más importantes para el cálculo de prestaciones ferroviarias.

Palabras clave: Locomotora, FEVE, Reforma, Prestaciones, Maniobras

### Abstract

*The article describes the different phases of the complete alteration of a metric gauge diesel shunting locomotive built in 1966. It also explains the operation of the renovated vehicle and presents the new operating parameters, indicating the most important concepts of the calculation of railway performances.*

*Keywords: Locomotive, FEVE, alteration, performance, Shunting*

---

## 1. Introducción

Este artículo resume el proyecto fin de carrera Locomotora Naval 1322 de FEVE: Reforma, funcionamiento, prestaciones, basado en los trabajos de reforma que fueron realizados durante el año 2010 para la recuperación de la locomotora por parte de la empresa Intervías. El propósito del proyecto, además de describir estos trabajos, ha sido detallar el funcionamiento de la locomotora renovada y calcular sus prestaciones.

### *1.1. Encargo de la reforma*

La empresa propietaria de la locomotora Naval 1322 es FEVE (Ferrocarriles de Vía Estrecha), que es una compañía estatal dependiente del Ministerio de Fomento. FEVE gestiona la mayor parte de la red española de vía métrica, incluyendo el material rodante que circula por ellas. Esta red se encuentra principalmente en el norte de la península, atravesando las comunidades autónomas de Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco y Castilla y León; aunque también incluye una línea de vía métrica ubicada en Murcia.

La reforma de la locomotora se enmarca dentro del conjunto de proyectos realizados o encargados por FEVE durante los años 2009, 2010 y 2011 para la conservación de su patrimonio histórico. Otro de los trabajos efectuados dentro de este grupo fue la remodelación de la locomotora de vapor VA8, que se muestra en la figura 1.1 y que fue presentada en octubre de 2011.



Fig. 1. Locomotora de vapor VA8

Mediante la reforma de la locomotora Naval, FEVE tenía como objetivo devolverla al servicio, ya que había sido retirada de circulación a principios de los años noventa. Se pretendía de esta forma reutilizar la locomotora para realizar maniobras en talleres y para remolcar una composición de cuatro coches antiguos de pasajeros, configurando así un pequeño tren turístico. Este tren efectuaría trayectos entre el Museo de Ferrocarril de Cistierna y el Museo de la Siderurgia y Minería de Sabero. Cistierna y Sabero son dos municipios de la provincia de León.

### 1.2. Historia de la locomotora Naval 1322

La locomotora Naval 1322 fue adquirida en 1966 por la operadora privada de vía estrecha Ferrocarriles de La Robla, que en 1972 se integraría en FEVE. Estaba incluida en un lote de 8 unidades del mismo modelo que se matricularon en la compañía de La Robla con los números de serie 201-208. Una vez que FEVE se hizo cargo de la empresa, se registraron como 1318-1325. El lote a su vez formó parte de las 25 locomotoras del mismo tipo que varias compañías ferroviarias de vía métrica adquirieron en la década de 1960. Estas 25 unidades permitieron la retirada del servicio de las últimas locomotoras de vapor de vía métrica que todavía circulaban por el norte de España. En este aspecto, tienen un importante valor histórico. (1)

Las 25 locomotoras fueron montadas en los talleres de Sestao (Vizcaya) de la Sociedad Española de Construcción Naval siguiendo un diseño de la compañía inglesa YEC (Yorkshire Engine Company), una empresa ferroviaria ya desaparecida que estaba situada en Sheffield, un municipio perteneciente al condado de South Yorkshire, Inglaterra. Las 25 locomotoras eran prácticamente iguales, solo se diferenciaban en el motor. De ellas, doce incorporaban un motor diésel Rolls & Royce C6SFL de 164KW con seis cilindros en línea. El resto, entre las que se encuentra la 1322, también tenían un motor diésel Rolls & Royce del mismo tipo, pero era el modelo C6TFL de 210KW, más potente.

Durante sus años de servicio, la Naval 1322 fue utilizada para maniobras y transporte de viajeros en trayectos cortos. Se retiró de la circulación a principios de la década de 1990 en el depósito de Cistierna, donde permaneció hasta la fecha de inicio de la reforma de la que trata este proyecto, a finales de 2009.

### 1.3. Objetivos de la reforma de la Naval

Desde un punto de vista técnico, la finalidad de la reforma fue transformar la locomotora 1322 para que fuera compatible con el sistema de circulación actual de FEVE, manteniendo al mismo tiempo su estética original. Para ello, se desinstalaron todos los equipos de la locomotora, ya que estaban inservibles, y se montaron otros nuevos. Solo se conservaron algunos componentes mecánicos como el bastidor o el rodaje. Además, la

locomotora fue pintada con un diseño que recuerda el aspecto que tenía cuando pertenecía a Ferrocarriles de La Robla, que es diferente al que se dispuso con FEVE.

Los trabajos de renovación se realizaron en talleres de Reinosa (Cantabria), pero se organizaron y planificaron desde una oficina de Madrid. En estas oficinas se proyectó la nueva disposición de la locomotora, se seleccionaron los nuevos equipos, se diseñaron nuevas piezas y en definitiva, se determinaron las nuevas características de la Naval.

La distancia entre las oficinas y el taller supuso un problema que se solucionó con el uso del programa Inventor, de Autodesk. Mediante este programa se creó un modelo en tres dimensiones con las medidas originales de la locomotora, lo que permitió diseñar la disposición de los equipos de una forma mucho más rápida y efectiva. Los nuevos elementos que eran instalados en la locomotora real iban siendo incluidos poco a poco en el modelo. Cuando se concluyó la reforma se obtuvo una representación tridimensional bastante realista de la Naval. En las figuras 2, 3 y 4 se muestran imágenes de la Naval en su estado original, del modelo tridimensional y del aspecto después de la reforma.



Fig. 2. Locomotora Naval 1322 antes de la reforma



Fig. 3. Modelo tridimensional de la Naval



Fig. 4. Locomotora Naval 1322 reformada

## 2. Descripción de la reforma

La Naval es una locomotora diésel de vía métrica. Puede circular indistintamente en ambos sentidos, contando con seis marchas en ambos casos. La reforma permitió adaptar a la locomotora a la red de FEVE, ya que se incluyeron todos los elementos de seguridad necesarios para ello. Inicialmente, la Naval disponía de un motor Rolls & Royce que luego fue sustituido por un motor Volvo TAD-750VE de 200 KW y 6 cilindros en línea.

### 2.1. Estado inicial

El estado de la locomotora antes de comenzar los trabajos de reforma era ruinoso, como se observa en la figura 5 Según FEVE, la Naval había estado 13 años a la intemperie antes de la renovación. Durante esos años, sufrió continuados actos de vandalismo. La mayoría de sus piezas estaban oxidadas y los sistemas estaban irreparables debido a la falta de mantenimiento.



Fig. 5. Estado inicial de la locomotora Naval

## 2.2. Primeros trabajos de reforma: transporte, desmontaje, chorreado y lijado

Los trabajos de reforma se iniciaron con el transporte de la locomotora desde Cistierna, donde había pasado los últimos 13 años, hasta Reinoso, donde se realizarían la mayor parte de las tareas de remodelación.

Una vez en el taller de Reinoso, se procedería al desmontaje completo de todas sus piezas, unas para ser sustituidas, y otras para ser arregladas o mejoradas. Después del desmontaje, el aspecto de la locomotora era el de la figura 6.



Fig. 6. Locomotora desmontada

Realizado el desmontaje, se dispuso a la corrección de abolladuras en las distintas piezas de la carrocería, bastidor y otras partes mecánicas de la locomotora que serían reutilizadas. Se les aplicó un chorro de arena para eliminar óxidos, y un lijado, para eliminar los defectos que aun estuvieran presentes, quedando la carrocería y el bastidor como se muestra en la figura 7.



Fig.7. Locomotora desmontada, después de los primeros tratamientos

## 2.3. Fase de diseño, adquisición y montaje de nuevos componentes

El siguiente paso en los trabajos fue la selección y adquisición de los nuevos elementos y sistemas de la locomotora. Para ello se hicieron cálculos de prestaciones, de frenado, de carga, etc., todo con el fin de definir

los componentes más apropiados para permitir el funcionamiento correcto y seguro. De esta forma, se decidió la distribución de los nuevos elementos de la locomotora y se diseñaron los sistemas de sujeción necesarios.

A continuación, se inició el montaje de los elementos principales. Se colocó el motor, la caja de cambios y el resto de nuevos equipos. También se volvieron a montar los ejes originales con las ruedas, el grupo cónico inicial, y la timonería de freno también original. Finalmente, se montó todo el cableado conectando los sistemas para permitir su control, y se colocaron los conductos de la red de aire comprimido y del grupo motriz. En la figura 8 se muestra el motor Volvo antes de que fuera instalado.



*Fig. 8. Motor Volvo TAD-750VE*

#### *2.4. Fase final*

Cuando la locomotora ya tenía la mayoría de los nuevos elementos instalados, se aplicaron los tratamientos superficiales que quedaban. Las piezas de la carrocería y el bastidor, que ya habían sido chorreadas y lijadas, fueron emplastecidas, imprimadas y pintadas. La locomotora se pintó según encargo: los bajos, de color negro, y el resto, según un esquema proporcionado por FEVE.

Una vez terminados los trabajos de pintado y de instalación, la locomotora quedó lista y se transportó de Reinos a El Berrón (Asturias), donde FEVE realizaría las pruebas necesarias para su aprobación para la circulación. En la figura 9 se muestra el estado final de la cabina, y en la figura 10, la descarga de la locomotora renovada en su destino: El Berrón.



*Fig. 9. Detalle de la cabina pintada con todos los mandos instalados*



Fig. 10. Descarga de la locomotora en los talleres de El Berrón

### 3. Funcionamiento y partes de la locomotora

En la figura 11 también se presenta un esquema con la locomotora seccionada. Los componentes indicados en la figura son elementos del sistema de tracción (número 1), del sistema de freno (número 2), de los sistemas de seguridad (número 3), de los sistemas de comunicación (número 4), de los sistemas auxiliares (número 5), del sistema de control (número 6), de la cabina (número 8), de las suspensiones (número 9), de las conexiones con vagones o coches (número 10) y del bastidor y la carrocería (número 11).

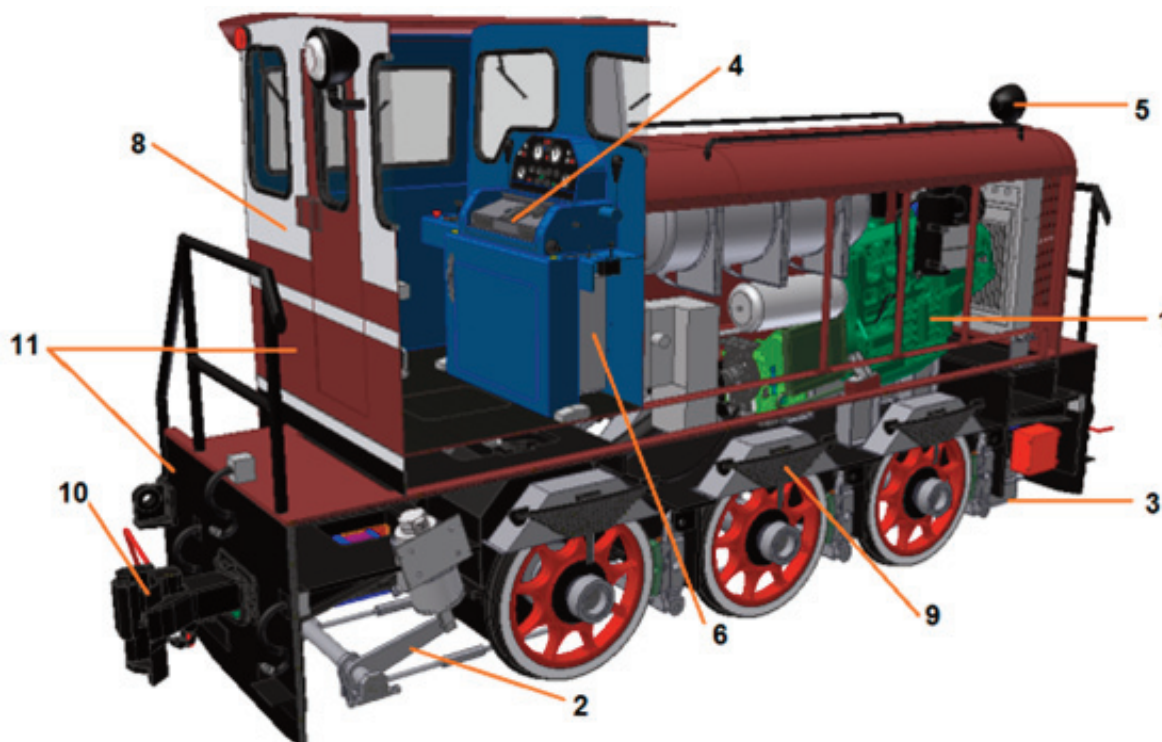


Fig. 11. Esquema de la locomotora

Observando la figura 11, puede comprenderse el funcionamiento de la locomotora a grandes rasgos. El elemento que aporta movimiento a la locomotora es el sistema de tracción, compuesto a su vez por el sistema motriz (conjunto motor y transmisión) y el rodaje. El conjunto motor produce el giro de un cigüeñal que conecta con la transmisión, que consta de una caja de cambios, un eje cardan y un grupo cónico. Estos elementos

comunican el movimiento del motor a un rodaje formado por tres ejes de rodadura y bielas tractoras, permitiendo que sus ruedas rueden por la vía.

Otra de las principales funciones de la locomotora es la del frenado. El sistema de freno se compone de una red neumática que suministra aire a unos cilindros. Estos cilindros accionan una timonería que transmite el movimiento a unas zapatas que actúan sobre las ruedas, reduciendo su velocidad de giro mediante rozamiento. La locomotora dispone de varios tipos de freno: de servicio o de emergencia (según la fuerza y el tiempo de aplicación), y automático o directo (según se aplique a una composición o solo a la locomotora).

Desde la cabina, el maquinista controla la tracción, el frenado y otros sistemas de la locomotora. Además, cuenta con indicadores que le permiten obtener la información necesaria para una circulación segura por vía y para conocer el estado de los componentes que pueden fallar.

Para evitar accidentes, la locomotora cuenta con dos sistemas de seguridad: ASFA y hombre muerto, que entre otras cosas, permiten aplicar el freno durante la circulación en el caso de que el maquinista quede temporalmente imposibilitado para la conducción.

Todas las funciones motrices, de freno, de seguridad y de aviso son gestionadas en última instancia por un automático que establece las relaciones entre los diferentes equipos. En la figura 12 se explica mediante un diagrama de flujos las distintas relaciones que existen entre los diferentes sistemas de la locomotora.

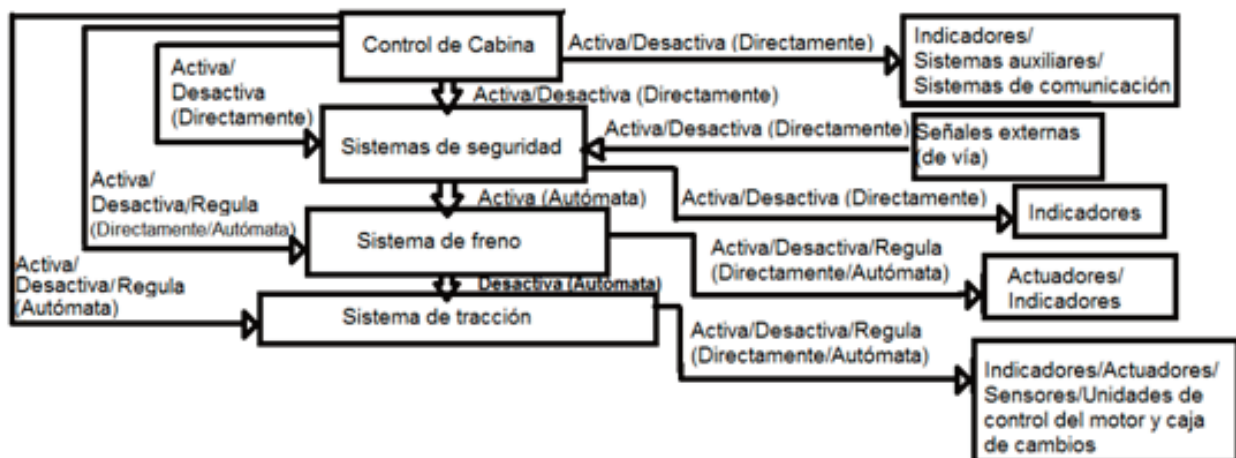


Fig. 12. Diagrama de gestión de la locomotora. Se indica si los controles se realizan mediante elementos internos a los sistemas (Directamente), o si se hace mediante el automático (Automata)

## 4. Prestaciones

La determinación de las prestaciones de un vehículo ferroviario requiere la consideración que varias variables que determinan en mayor o menor medida su comportamiento dinámico. Este artículo no hace una descripción rigurosa de todos los conceptos que deben tenerse en cuenta para el cálculo de prestaciones de tracción y frenado, ya que eso supondría extenderse demasiado, pero sí que se tratan los aspectos más generales.

### 4.1. Prestaciones de tracción

El objetivo básico de la obtención las prestaciones de tracción es determinar si un vehículo puede circular por un tramo de vía satisfaciendo ciertas condiciones. Para ello se calcula la fuerza que éste puede aportar para su movimiento y se compara con las fuerzas resistentes que se espera que se tenga durante el avance. Mediante esta primera comparación, pueden obtenerse algunas características importantes de los vehículos, como su



velocidad, aceleración, carga y rampa máximas.

El primer aspecto que es necesario conocer para hacer posible la determinación de las prestaciones es la resistencia al avance. Esta resistencia depende de los rozamientos producidos en el vehículos al rodar (en ruedas y rodamientos); del aire in filtrado por las rejillas de ventilación; de la presión, fricción y velocidad del aire circulante alrededor de la locomotora; de los radios de las curvas trazadas; de las aceleraciones y masas aceleradas; de la rampa o pendiente superadas, y de la carga soportada. Cada una de estas variables está definida por una fórmula, siendo la resistencia total la suma de cada una de ellas. (2)

La fórmula siguiente indica las componentes resistentes cuando no existen curvas, rampas ni aceleraciones. Pueden observarse tres términos, que representan la resistencia mecánica (producida por el rozamiento generado el rodar); la resistencia a la entrada de aire, y la aerodinámica (debida a la circulación del aire). Los símbolos que aparecen en la fórmula corresponden a los diferentes parámetros que determinan cada una de las componentes, pero no es necesario conocerlos para tener una idea general de cómo se realiza el cálculo de prestaciones.

$$R_{\text{avance recta}} = A + BV + CV^2 = 9800 \cdot \left( \xi \cdot M + \frac{r_{\text{aer}}}{R_{\text{rueda}}} \cdot (M - M_{\text{no.suspendida}}) \cdot \mu_{\text{rod}} \right) + Q \cdot 0,34 + T_f \cdot C \cdot (V + V_v \cdot \sigma)^2$$

Una vez que se ha estimado la resistencia que debe superar un vehículo para recorrer un determinado tramo, se calcula su fuerza motriz en función del par y número de revoluciones de su sistema motor, teniendo en cuenta la relación de transmisión entre el motor y el rodaje. De esta forma, se obtiene la fuerza motriz según la velocidad del vehículo. Además, es importante tener en cuenta el límite adherente, que hace que determinados valores de la fuerza motriz no estén limitados por la fuerza aportada por el motor, sino por la relación adherente entre las ruedas y el carril.

La fuerza motriz y la resistencia al avance dependen de la velocidad del vehículo. Debido a ello, pueden representarse en una gráfica conjunta desde la que se pueden determinar gráficamente algunos datos de interés, como la velocidad, rampa y aceleración máximas limitadas por las resistencias y la fuerza motriz. Estas características también pueden determinarse aplicando fórmulas, lo que es aconsejable ya que los resultados obtenidos así son más precisos.

#### 4.2. Prestaciones de frenado

La capacidad de frenado de una locomotora o tren es una de sus magnitudes más importantes, ya que determina su seguridad en circulación. Existen tres principales tipos de frenado cuyas prestaciones deben ser calculadas: el freno de servicio, que es el que se utiliza en ocasiones normales; el de urgencia, para situaciones en que se requiera una mayor deceleración, y el de estacionamiento, que evita el movimiento cuando el vehículo está en reposo. Las fuerzas de frenado de urgencia, servicio y estacionamiento tienen un valor que establece el fabricante y que deben satisfacer las exigencias de la administración ferroviaria por donde se circule.

Las prestaciones más importantes que dependen de las fuerzas de frenado son la distancia de frenado y el coeficiente de frenado. A la hora de determinar si las fuerzas de frenado del vehículo son apropiadas, debe comprobarse si producen bloqueo de rueda y si cumplen con las exigencias en cuanto a distancias de frenado y coeficiente de freno de los administradores de las líneas por donde circule. (3)

#### 4.3. Prestaciones de la locomotora Naval

Los resultados de prestaciones obtenidos para la locomotora se basan en las consideraciones que se han indicado muy resumidamente en los apartados 4.1 y 4.2. Se han utilizado muchos parámetros que no han sido explicados por no ser completamente necesarios para una comprensión general del proyecto.

En la figura 13 se indican los diferentes valores de la resistencia al avance (sin tener en cuenta el paso por curvas o la aceleración). La figura 14 representa la fuerza motriz aportada por el motor y la limitación adherente (que en este caso no ejerce ninguna influencia), y en la 15 se muestra la carga máxima remolcable por la locomotora en función de la velocidad y la rampa. Finalmente, en las tablas 1 y 2 se recogen los valores más importantes de las prestaciones de tracción y frenado.

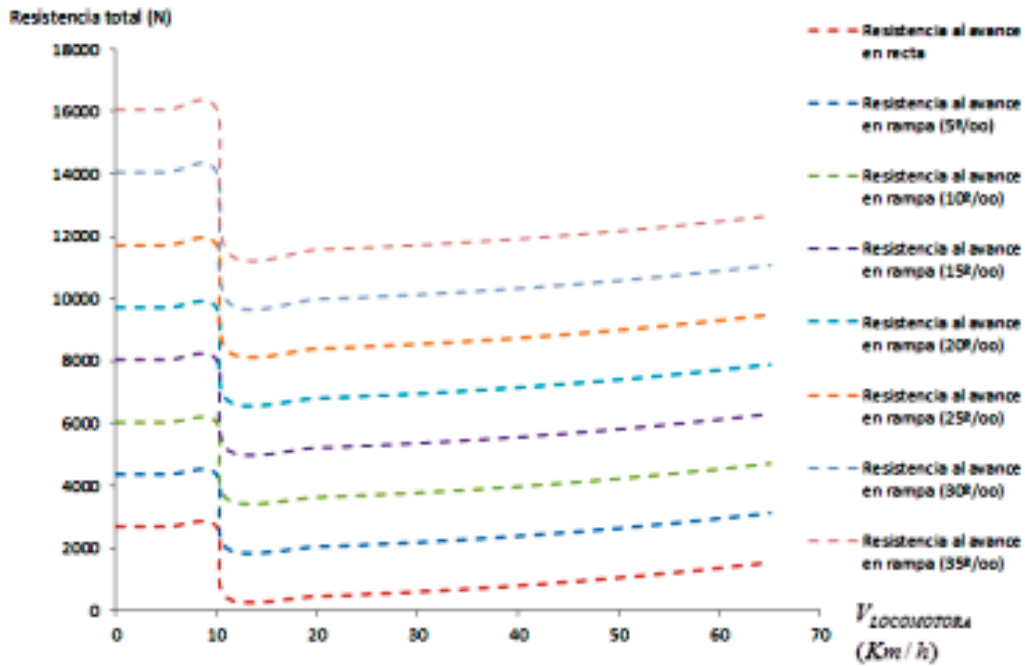


Fig. 13. Resistencia total al avance de la locomotora. Se consideran las resistencias en recta, en rampa y en el arranque en función de la velocidad y la rampa.

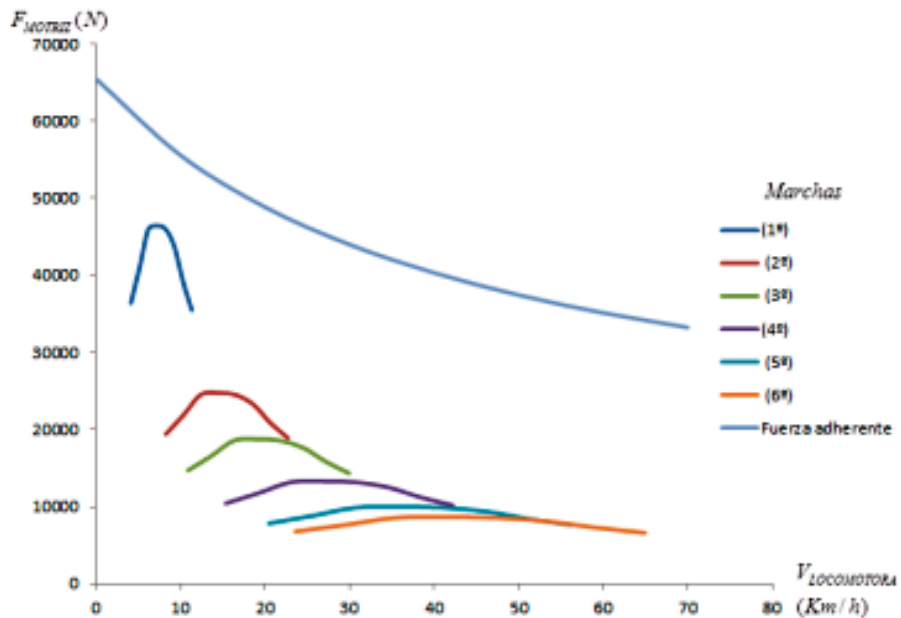


Fig. 14. Fuerza motriz y límite adherente en función de la velocidad y la relación de transmisión.

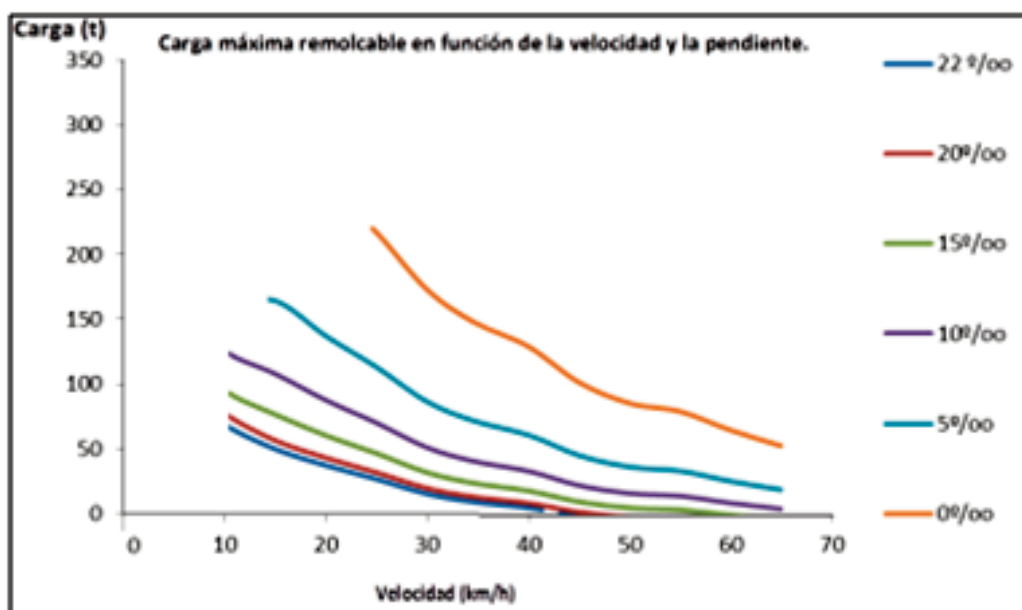


Fig. 15. Carga máxima remolcable para diferentes rampas. El valor máximo es de 216,7t y se da a 25km/h y 0 milésimas de rampa.

Tabla 1. Principales parámetros de las prestaciones de tracción

Fuerza motriz máxima (a 7 km/h)	47783,96 N
Máxima rampa abordable (a 7 km/h)	130,69 daN/t
Velocidad máxima	67,93 km/h
Aceleración máxima absoluta (a 7 Km/h)	1,24 m/s <sup>2</sup>
Carga máxima remolcable (a 25 km/h y 0 daN/t de pendiente)	216,7 t

Tabla 2. Principales parámetros de las prestaciones de frenado

Fuerza de freno de urgencia	13778,89 N
Fuerza de freno de servicio máxima	11482,41 N
Fuerza de freno de estacionamiento	10798,5 N
Coefficiente de frenado en freno de urgencia (valor aproximado)	41,24%
Coefficiente de frenado en freno de servicio (valor aproximado)	34,38%
Coefficiente de frenado en freno de estacionamiento	16,17%
Deceleración de urgencia	0,41 m/s <sup>2</sup>
Deceleración de servicio máxima	0,34 m/s <sup>2</sup>
Distancia máxima de frenado de urgencia (sin rampa, a 67,93 km/h)	481,42 m
Distancia máxima de frenado de servicio (sin rampa, a 67,93 km/h)	664,79 m

## 5. Conclusión

El objetivo de este artículo ha sido resumir en muy pocas líneas las fases más importantes de la reforma de una locomotora, indicando además los principales conceptos que sirven para determinar las nuevas características tras la reforma. También se han descrito alguna de las últimas técnicas para los trabajos de fabricación y reforma, como el uso del programa Inventor de Autodesk para el diseño de componentes.

Mediante la determinación de las prestaciones, se ha permitido establecer las capacidades de la locomotora para su explotación. De esta forma, se ha aportado a FEVE la información necesaria para que pueda obtener el máximo rendimiento de la locomotora, garantizando una circulación segura y sin problemas.

## 6. Referencias

[1] “Proyectos de conservación de elementos del Patrimonio Industrial Histórico ferroviario Vía Métrica” [en línea]. Vía Libre. Madrid, 15 noviembre 2010 [ref. de 15 septiembre 2011]. Disponible en internet: <[http://www.vialibre-ffe.com/pdf/Patrimonio\\_feve.pdf](http://www.vialibre-ffe.com/pdf/Patrimonio_feve.pdf)>.

[2] García Álvarez, A., “Dinámica de los trenes de alta velocidad”. 6º ed. Madrid: Fundación de los ferrocarriles Españoles, 2010. 99 p. Serie Documentos de explotación técnica y económica. ISBN: 9788489649620.

[3] Álvarez Mantas, D.; Luque Rodríguez, P., “Ingeniería e Infraestructura de los Transportes”. 1ºed. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2003. 578 p. ISBN: 9788483173657.

# Sistema EIDOS

## *EIDOS system*

Francisco Cebrián Gómez

*Universidad de Castilla - La Mancha, Albacete, España*

---

### Resumen

El sistema EIDOS (Equipamiento Informático Destinado a la Orientación y Seguridad) surge de la intención de servir de apoyo, en esta ocasión, a los operarios del ferrocarril, ante la posibilidad de que surja un incendio próximo a la vía por la que debe circular el tren. La prioridad es facilitar al maquinista la visualización de cómo se desarrolla el incendio (así como otro tipo de información adicional relevante) mediante el uso de algún tipo de dispositivo móvil.

El objetivo que se pretende es la creación de una interfaz, que debe informar en todo momento al usuario y de la manera más eficiente posible.

Palabras clave: EIDOS, ferrocarril, incendio, interfaz.

### Abstract

*EIDOS system (Computer Equipment Destined for Orientation and Safety) comes from the intention to provide support, on this occasion, to train operators, about the possibility of occurrence of fire near the railway on which the train must move. The priority is to facilitate the machinist the visualization of how the fire develops (as well as other relevant information) using any mobile device.*

*The objective to be achieved is the creation of an interface that should always inform the user in every moment and the most efficient way possible.*

*Keywords: EIDOS, train, fire, interface.*

---

## 1. Introducción

En este primer capítulo de introducción, se planteará la motivación y la relevancia de este proyecto. Por ello, inicialmente se realizará una aproximación al sistema EIDOS, en el cual se encuentra contenida la interfaz creada. Esta aproximación quedará limitada a una visión general de la arquitectura y estructura del sistema. Así mismo se iniciará un primer acercamiento al simulador utilizado, que nos facilitará un entorno en el que poder realizar diferentes pruebas y analizar los resultados sin requerir un despliegue de medios en un escenario real. Esta primera toma de contacto con el sistema EIDOS será necesaria y suficiente para captar los objetivos que persigue este proyecto.

### *1.1. Motivación y relevancia del proyecto*

Bien sabido es que los incendios forestales es algo que año tras año se viene produciendo dejando tras de sí grandes pérdidas materiales, económicas y ambientales. En ocasiones, esos incendios llegan incluso a interferir con el tráfico ferroviario poniendo en riesgo la vida de los operarios del tren, así como la de los pasajeros que se encuentran en él.

Un ejemplo claro fue el ocurrido en Soria en el año 2009 (ver Figura 1), donde un incendio en el término municipal de Arcos de Jalón, concretamente en las localidades de Jubera, Somaén y Velilla de Medinaceli, obligó a cortar el tráfico ferroviario entre Medinaceli y la localidad afectada durante más de tres horas.

Las llamas afectaron a tres hectáreas de masa forestal, fundamentalmente de rosáceas y vegetación de ribera, así como de encina y pino.

El origen del incendio se estableció en cuatro focos generados a lo largo de 20 kilómetros entre Medinaceli y Arcos de Jalón, al sur de la vía férrea Madrid-Zaragoza-Barcelona, confirmándose que se produjeron a causa de las chispas generadas al paso de un tren.

Los viajeros que se vieron afectados por el corte de la línea fueron 13.000.



Fig. 1. Incendio ferroviario en Soria, 2009

El proyecto EIDOS pretende servir de apoyo a los operarios del ferrocarril para facilitar en tiempo real:

- La detección del incendio en su lugar de origen.
- La dirección y supervisión del fuego.
- Información de la rapidez de avance y magnitud del incendio.

Con estos datos se podrían coordinar medidas de emergencia inmediatas al detectarse el incendio, minimizando las consecuencias que produce este fenómeno descontrolado.

### 1.2. Arquitectura y estructura del sistema EIDOS

El sistema EIDOS está constituido principalmente por tres tipos de dispositivos, donde cada uno juega un papel de vital importancia. Primeramente se encuentran los nodos, también llamados “motes”, que son los que conformarán nuestra red de sensores WSN (Wireless Sensor Network) desplegada en la zona que se quiere controlar (ver figura 2.). Los nodos están provistos de sensores que permiten captar, medir y procesar periódicamente una serie de magnitudes físicas (temperatura, humedad, presión,...). Además, pueden estar dotados de un receptor GPS, de forma que permita conocer la posición del propio nodo. Como se verá más adelante, esta información puede resultar útil a los nodos situados en las proximidades que desconozcan su posición.

Otro elemento esencial es el dispositivo móvil inalámbrico que se colocará en la cabina del maquinista, PDA's, UMPC's (Ultra Mobile PC's) o similares, que será capaz de captar, analizar y reproducir la información generada y transmitida por parte de los nodos de la red de sensores.

Finalmente, se requerirá el uso de uno o varios vehículos ferroviarios que serán los encargados de desplegar una gran cantidad de nodos sobre la zona intervenida. Opcionalmente, se puede considerar la posibilidad de establecer una estación base que gestione la información producida por los nodos desplegados, aunque el correcto funcionamiento de todo el sistema no depende de la existencia de dicha estación.

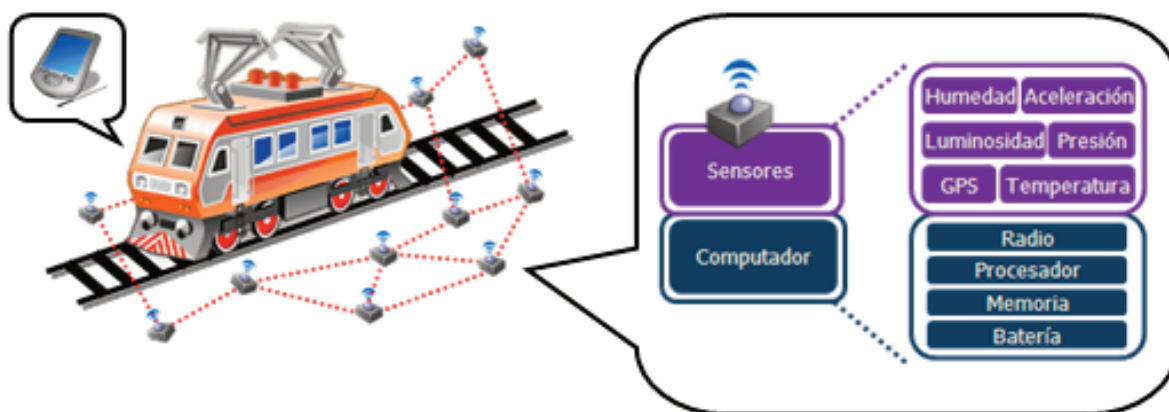


Fig. 2. Arquitectura del sistema EIDOS

#### Retos técnicos del sistema:

Uno de los puntos a tener en cuenta son las técnicas de localización que permitan a los nodos conocer su posición en el escenario. Resulta crucial, de cara a la representación y visualización de los datos en la interfaz, que los nodos conozcan su posición una vez desplegados en la zona, lo cual resultaría sencillo si todos los nodos contasen con un receptor GPS. La realidad es que sería muy costoso, económicamente hablando, que todos los sensores dispusieran de GPS, por lo que solo un determinado porcentaje de ellos vendrán provistos con dicho hardware. No obstante, a pesar del problema que pueda aparentar a simple vista, todos los nodos podrán estimar su localización intercambiando información con aquellos nodos cercanos que dispongan de GPS, de forma que se pueda ir acotando la posición en la que se encuentran. Así mismo, el vehículo encargado del despliegue de nodos, también llevará incorporado otro GPS con el fin de facilitar el proceso de localización.

El otro reto técnico consiste en la obtención de un modelo del fuego por parte de los nodos de la red. Para ello, será necesario definir los mecanismos de difusión de la información captada y de agregación de la misma en una estructura de datos que capture la información relevante para el operario del tren. En la figura 3 los nodos han obtenido una determinada representación del incendio, a la que tiene acceso el maquinista.

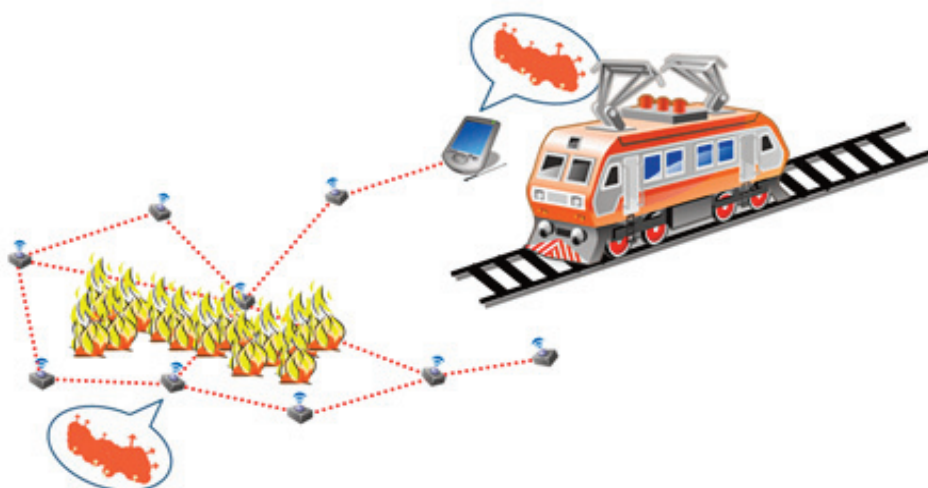


Fig. 3. Información captada por los nodos y transmitida al dispositivo móvil

Como se ha dicho anteriormente, se requiere el uso de un entorno de simulación con el que poder realizar pruebas y comprobar los resultados, con el fin de constatar el comportamiento del sistema, ya que sería impensable realizar todas estas comprobaciones en un escenario real, tanto por el elevado gasto debido al hardware, como por la peligrosidad y los daños que implicaría.

La herramienta de simulación está constituida por diversos módulos independientes, pero que a su vez están interconectados entre sí mediante una base de datos común a todos ellos. En la figura 4 se muestra la distribución de los diferentes módulos que conforman la arquitectura del entorno de simulación.

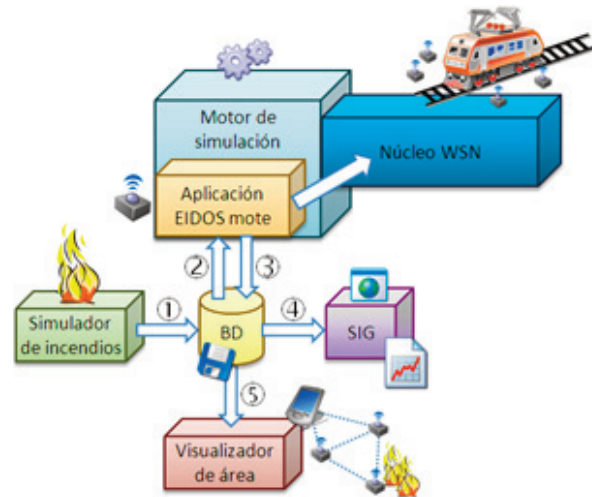


Fig. 4. Arquitectura del entorno de simulación

A grandes rasgos, el proceso es el siguiente:

(1) A través de la herramienta FARSITE simulamos un incendio en un área específica, haciendo uso de datos reales geográficos y ambientales, tras lo cual los resultados quedan almacenados en la base de datos global.

(2) Los datos almacenados son usados por el motor de simulación de la red de sensores que realiza el despliegue de nodos en la zona.

(3) Cada nodo dispone de una aplicación propia que es ejecutada para permitir detectar su posición en el terreno, así como para determinar la evolución del fuego. Nuevamente, todos los resultados vuelven a ser guardados en la base de datos.

(4) Y (5) La visualización y representación de los datos recogidos se puede realizar a través de un SIG (Sistema de Información Geográfica), o bien mediante el uso de un visualizador gráfico que permite al usuario analizar el comportamiento de las aplicaciones ejecutadas por los sensores.

## 2. Estado del arte

En este capítulo se abordarán diferentes aspectos sobre los que se apoya este proyecto, con intención de establecer unos conocimientos previos requeridos y poner un punto de partida a la hora de empezar el desarrollo de la interfaz.

### 2.1. Red inalámbrica de sensores

Partiendo de la dificultad que entraña realizar el despliegue de nodos, la red de sensores [1] debe quedar, en la medida de lo posible, lo mejor distribuida posible (tanto en cantidad de sensores desplegados como en su posterior emplazamiento en la zona), a fin de lograr una correcta y, al mismo tiempo, precisa representación



del incendio en la interfaz. Una mala distribución de los nodos conllevará que la representación y posterior visualización del fuego en la aplicación móvil no se efectúe de una manera adecuada.

Dentro de este marco, se debe garantizar que los datos recogidos por los nodos lleguen con éxito a todos los puntos de la red, ya que la pérdida de mensajes podría dar al traste con la correcta visualización del fuego y en consecuencia inducir a errores. Es por ello que se deberá emplear un mecanismo de difusión eficaz.

Ya por último, otro factor clave que influirá en el desarrollo de nuestra aplicación, es la localización de los nodos. Todos los nodos deben conocer su posición en el terreno, cosa que sería muy fácil de resolver si cada uno contase con un dispositivo GPS. Para reducir considerablemente los costes económicos, solo algunos de estos nodos vendrán provistos con este tipo de dispositivo de localización, por lo que el resto de nodos desplegados deberán calcular su posición tomando como referencia a aquellos que sí dispongan de GPS.

#### Localización de los nodos de la red

Un nodo puede clasificarse en dos tipos:

- Nodo baliza, o sencillamente ‘baliza’, si posee la capacidad de conocer su posición en el terreno en todo momento. Para ello, este tipo de nodos llevarán incorporado algún tipo de dispositivo de localización, como puede ser un GPS.

- Nodo desconocido, si carece de dispositivo de localización y, en consecuencia, desconoce la posición en la que se encuentra.

El sistema EIDOS basa la localización de los nodos de la red en técnicas de localización libres de distancia (range-free) [2], donde no es necesario calcular la distancia entre nodos, con el consiguiente ahorro hardware y computacional que ello supone. Sencillamente estas técnicas se basan en que si un nodo A puede escuchar los mensajes enviados por un nodo B, el nodo A se encontrará en algún punto dentro del área de cobertura de B.

Más concretamente, el sistema emplea la técnica de intersección rectangular [3], cuya idea es que si dos nodos pueden escucharse entre sí, se asumirá que uno de los dos está dentro de un cuadrado centrado en el otro nodo y cuyo lado es dos veces el radio de cobertura. De esta manera, cuantos más nodos sean capaces de comunicarse entre sí, más eficientemente se conseguirá acotar el emplazamiento de los nodos.

En la figura 5, el nodo oscuro desconoce su ubicación, y recibe la posición de tres nodos baliza. A partir de esa información, el nodo desconocido puede concluir que se encuentra dentro del rectángulo sombreado. Para que esta técnica resulte eficaz, el grado de conectividad entre los nodos debe ser considerable.

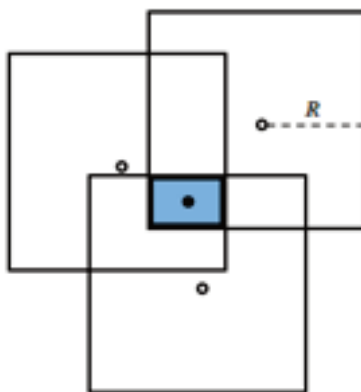


Fig. 5. Intersección rectangular

### Difusión de los datos a toda la red:

El éxito o el fracaso de este proyecto depende de la correcta difusión de los mensajes enviados por los nodos desplegados.

De entre los diferentes mecanismos de difusión de mensajes en redes de sensores, el sistema EIDOS emplea la difusión con retardo basado en área [4]. Básicamente, el mecanismo actúa de la siguiente manera; cuando un nodo recibe un mensaje por primera vez de algún vecino, el nodo receptor fija un tiempo de espera para la retransmisión del mensaje. Ese periodo de espera se establece en función del área de cobertura del nodo encargado de la retransmisión que ya haya sido cubierto por las copias recibidas desde otros nodos. Cuanto mayor sea el área de cobertura cubierta por otros nodos, mayor será el periodo de espera para la retransmisión. Si la cobertura del nodo es completada por otros nodos, la retransmisión del mensaje será cancelada.

En la figura 6 se puede ver un ejemplo de cómo actúa esta técnica de difusión. El nodo A envía un mensaje a los nodos que se encuentran dentro de su área de cobertura, que en este caso son los nodos B y C. Una vez los nodos han recibido el mensaje, comprueban qué cantidad de su área de cobertura ha sido ya cubierta, y en función de ese factor, determinan el tiempo de espera para la retransmisión del mensaje. En el ejemplo, el área de cobertura cubierta en B es mayor que el área de cobertura cubierta en C, por tanto el tiempo de espera para la retransmisión será mayor en B que en C. Por último, el nodo B volverá a recibir otra copia del mismo mensaje, en esta ocasión desde el nodo C. B deberá volver a comprobar que cantidad de su área de cobertura ha sido ya cubierta, y en función de esa comprobación, establecer un nuevo periodo de espera para la retransmisión. B deberá cancelar la retransmisión del mensaje si toda su área de cobertura ha sido ya cubierta, aunque no es el caso.

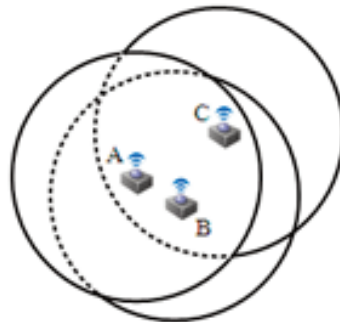


Fig. 6. Difusión de paquetes con retardo basado en área

### 2.2. Visualizador de área

Tras haber explicado ciertos aspectos de interés sobre la red inalámbrica de sensores del sistema EIDOS, en este apartado se hablará sobre las pantallas del visualizador de área (incorporado en la plataforma de simulación) que más influirán en el desarrollo de la interfaz. La figura 7 muestra el diagrama del entorno de simulación del sistema EIDOS.

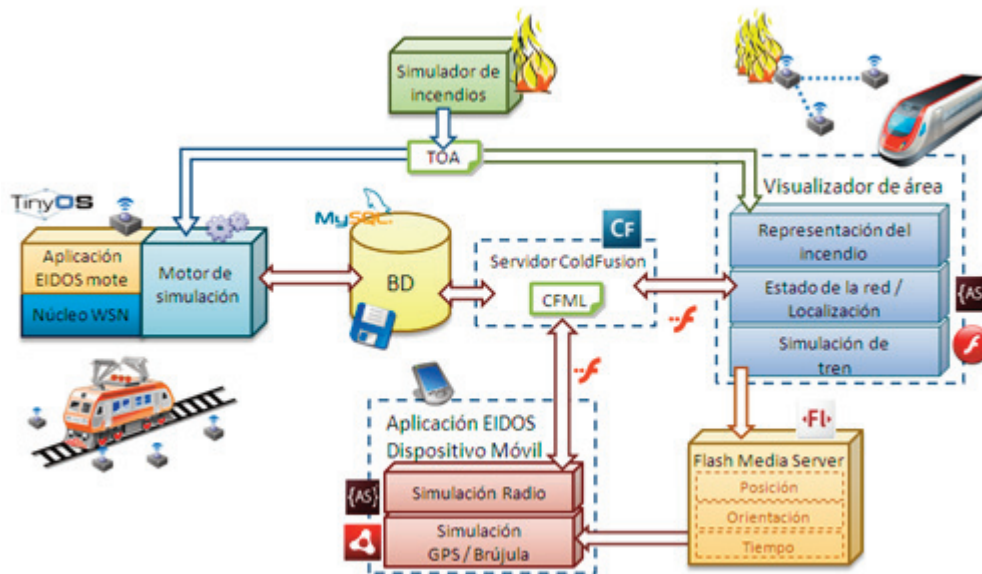


Fig. 7. Diagrama del sistema EIDOS

#### Pantalla de simulación del tren:

Tras seleccionar la simulación que queremos reproducir en el visualizador de área de entre todas las ofrecidas, elegimos la pestaña con el icono correspondiente que nos dará acceso a la pantalla de simulación del tren.

En esta pantalla, podremos ver las siguientes secciones (ver figura 8):

1. Mapa de la zona intervenida: En ella se puede observar el resultado del despliegue de la red sensores lo cual dará una idea de lo precisa que será la futura representación del incendio en la aplicación móvil. Así mismo, también se podrá comprobar el estado en el que se encuentran los nodos dependiendo del color con el que estén marcados.

- Gris: Desactivado.
- Amarillo: Activado.
- Rojo: Detecta la presencia de fuego.
- Negro: Quemado.

2. Línea de tiempo: A través de ella se podrá controlar el avance de la simulación, pausarla, detenerla e incluso aumentar la velocidad con la que se reproduce, según las necesidades del usuario.

3. Opciones de la pantalla: Dependiendo de la pantalla en la que nos encontremos, las opciones disponibles irán variando. En este caso, se podrá seleccionar el tipo de vía, mostrar, ocultar o desplazar el tren. También se conocerá la posición absoluta X e Y en la que se encuentra, así como su orientación. Todos esos desplazamientos y posiciones son los que posteriormente serán transmitidos a la aplicación móvil de forma que, cuando el tren realice un movimiento o un cambio de orientación, quedará reflejado en la interfaz de usuario de forma casi simultánea.

4. Pestañas: A través de las pestañas, las cuales contienen un icono descriptivo, se accederá a las diferentes pantallas del visualizador según interese. También se podrá regresar al menú de selección de la simulación o mostrar la pantalla de bienvenida donde se facilita información sobre el sistema EIDOS.

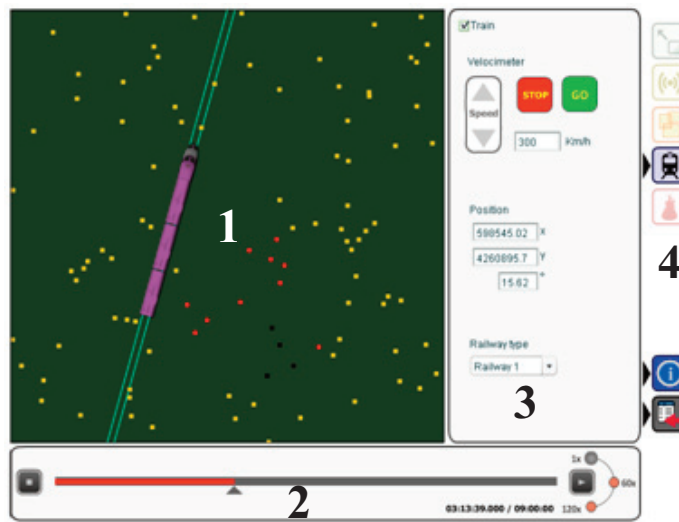


Fig. 8. Pantalla de simulación del tren

#### Pantalla de simulación del incendio:

Esta pantalla, al igual que la anterior, también resultará muy importante de cara a comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación móvil. En esta ocasión se muestra la evolución temporal de un fuego simulado por FARSITE (que para nosotros será real). Esto nos permitirá comprobar la calidad de la representación gráfica generada en la interfaz del maquinista.

Sobre la visualización del incendio simulado, existen dos posibilidades:

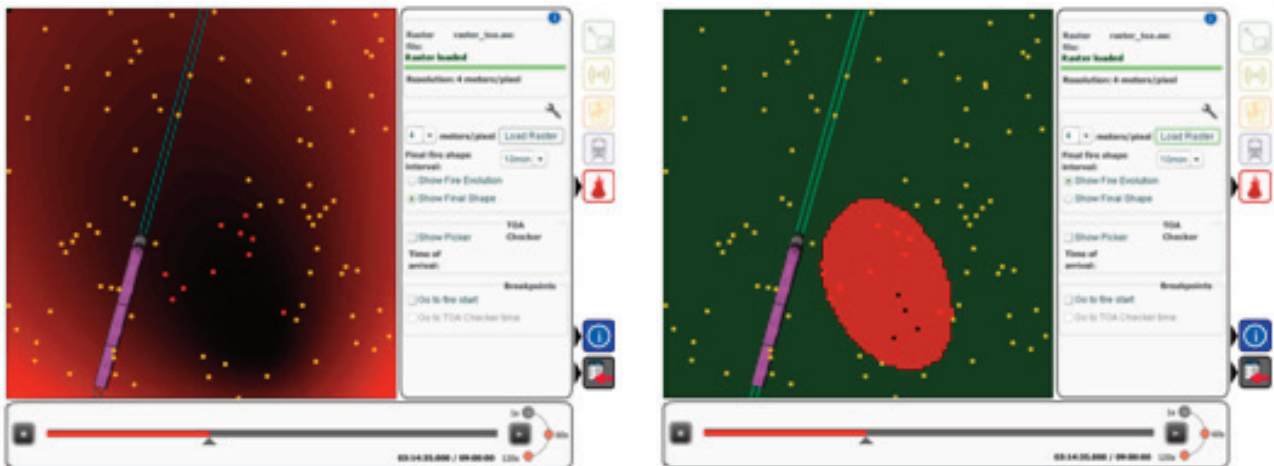


Fig. 9. Pantalla de simulación del incendio

- Vista final de la expansión del incendio (figura 9 (a)): Muestra un mapa de bits estático que estará disponible una vez se han calculado todos los tiempos de llegada del fuego (ToA) para cada punto del mapa. Los píxeles que componen el mapa de bits tomarán un color rojo más o menos intenso dependiendo del rango de tiempos en el que se encuentre su ToA y teniendo en cuenta el intervalo de tiempo seleccionado por el usuario, que en este caso son 10 minutos.

- Vista de la evolución del incendio (figura 9 (b)): En esta ocasión se muestra un mapa de bits dinámico. Partiremos de un mapa de bits transparente que progresivamente irá cambiando los píxeles a color rojo cuando el ToA alcance un valor inferior al tiempo de simulación actual.

### 3. Desarrollo

Volviendo al diagrama del sistema mostrado en la figura 7, nos centraremos en el desarrollo del módulo de la aplicación para el dispositivo móvil.

#### 3.1. Aplicación EIDOS del dispositivo móvil

Herramientas, lenguajes y tecnologías utilizadas:

- [5] Adobe Flash Professional: Es una herramienta de diseño originariamente creada para el desarrollo de animaciones de páginas web, aunque hoy en día su uso ha sido extendido a otros fines. Los proyectos en Flash pueden ser desde una sencilla animación hasta aplicaciones más complejas con un contenido muy variado como pueden ser imágenes, sonidos, vídeos, etc. Además, el hecho de que los proyectos de Flash no requieran máquinas potentes para su visualización, lo convierte en una herramienta idónea para multitud de aplicaciones, como por ejemplo la que se realiza en este proyecto.

- [6] ActionScript 3.0: Es un lenguaje de programación orientado a objetos que amplía las posibilidades de las funciones de Flash. Puede equipararse en potencia con lenguajes como Java y C#, gracias a un gran salto evolutivo que permite el desarrollo de aplicaciones complejas orientadas a objetos.

- [7] Adobe AIR 2: Es un entorno de ejecución multiplataforma para la construcción de aplicaciones RIA (Rich Internet Applications) empleando Adobe Flash, Adobe Flex, HTML y AJAX, las cuales pueden utilizarse como aplicaciones de escritorio. Con Adobe AIR disponemos de aplicaciones basadas en códigos no nativos corriendo en multitud de dispositivos (PC's, netbooks, tabletas, teléfonos inteligentes, televisores...), lo que en principio, nos permite tener aplicaciones que sin Adobe AIR, no podríamos tener.

Adobe AIR es similar a un plugin que se instala en el dispositivo que estemos utilizando. Una vez instalado podemos usar aplicaciones en formato .air que se instalarán en el dispositivo de forma fácil y rápida.

- Adobe Flash Media Server: La parte que más nos interesa de Flash Media Server (FMS) de cara al desarrollo de nuestra interfaz es la del uso de objetos compartidos (SharedObject) para sincronizar estructuras de datos complejas y llamar a métodos remotos en múltiples clientes. Para ello los usuarios deben estar suscritos a un objeto compartido determinado.

FMS actúa como puente de conexión entre las aplicaciones Flash mediante el protocolo Real Time Messaging Protocol (RTMP). Podría decirse que FMS, ejerce un papel de emisor y receptor de datos de los usuarios que se encuentran conectados. Parece pues, que Flash Media Server es una excelente opción para la compartición de datos entre el visualizador de área y la interfaz de usuario. De esta manera se mantendrá la sincronización entre ambas aplicaciones mediante el uso de los objetos compartidos (ver figura 10).

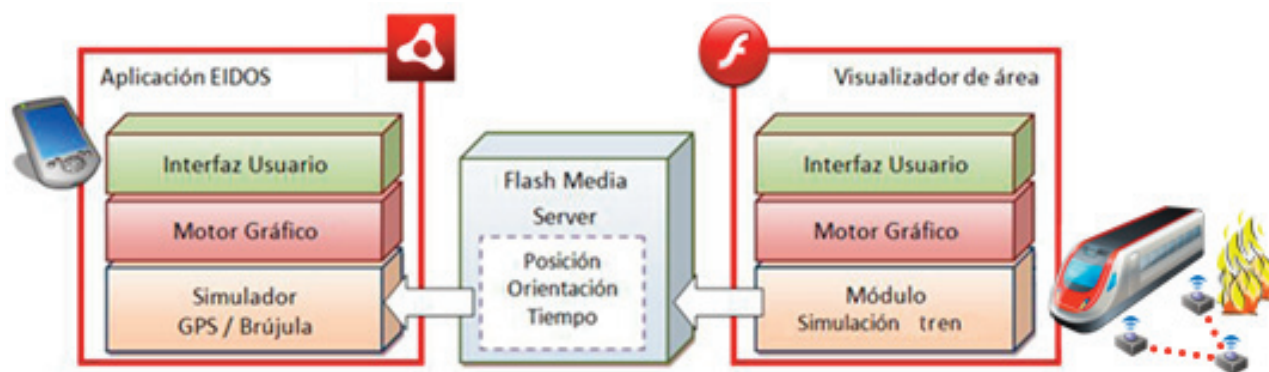


Fig. 10. Diagrama de conexión a través de Flash Media Server

- Adobe ColdFusion: Es un servidor de aplicaciones muy utilizado en el desarrollo de aplicaciones de Internet, por lo general páginas web dinámicas que enlazan con casi cualquier base de datos. ColdFusion se ejecuta de manera concurrente con la mayoría de los servidores web de Windows, Mac OS X, Linux y Solaris. ColdFusion no es un lenguaje de bases de datos, pero interactúa de manera sencilla con bases de datos (Oracle, MySQL, Access,...).

Ya por último, y de cara al desarrollo de la interfaz de usuario, ColdFusion incorpora la pasarela Flash Remoting que facilita enormemente la conexión de las aplicaciones de Flash a la base de datos (ver Figura 11).

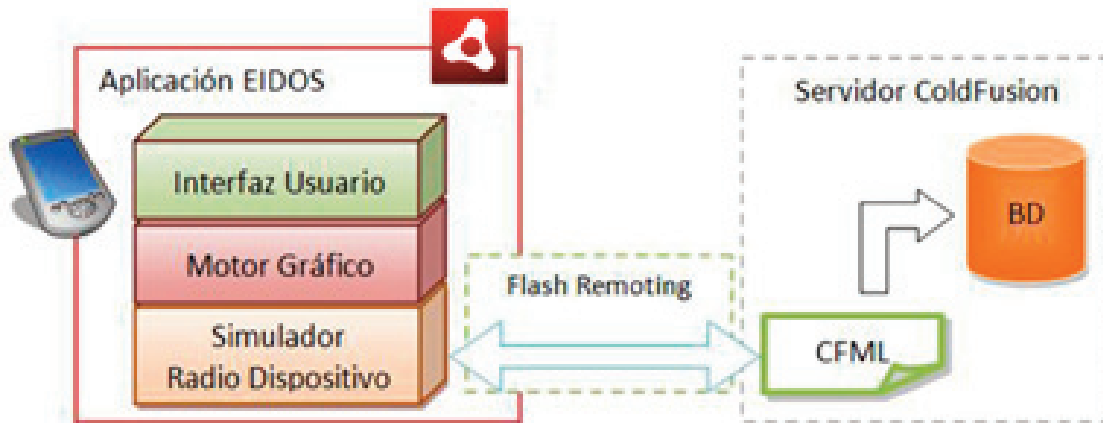


Fig. 11. Diagrama de conexión a través de ColdFusion

- [8] MySQL: Es un sistema de gestión de base de datos. Básicamente, permite crear una base de datos relacional y alojarla en un servidor web para almacenar datos o automatizar procedimientos. El motivo de la elección de MySQL es su fácil acceso mediante el lenguaje de programación Python, a través del cual se ha implementado el motor de simulación de la WSN. La base de datos del sistema EIDOS almacenará los datos suministrados por el simulador de incendios FARSITE así como los resultados obtenidos por el simulador de la WSN. Del mismo modo, proporcionará información al simulador de la WSN y al simulador de incendios de áreas forestales.

#### Implementación de la interfaz:

- Representación gráfica del fuego: para realizar la representación gráfica del incendio utilizaremos imágenes vectoriales. A través de código ActionScript 3.0, emplearemos un tipo de objeto gráfico similar a un clip de película, pero que carece de línea de tiempo, es decir, actúa como si solo tuviera un único fotograma. Este objeto gráfico, se llama Sprite y su uso es muy común para la implementación de componentes de interfaz de usuario (IU) que generalmente no usan línea de tiempo.

Dicho lo cual, para la representación gráfica de cada foco de fuego detectado, se hará uso del objeto Sprite y se dibujarán cuatro circunferencias concéntricas cuyo centro vendrá determinado por la posición que nos indique el paquete enviado por el sensor de la red que ha detectado el fuego. Las circunferencias tendrán diferente radio y estarán rellenas de un color que identifique el grado de peligrosidad, estableciendo así perímetros de seguridad. Así pues, en la figura 12 se muestra la representación gráfica que se visualizará en la interfaz cuando un nuevo foco de fuego sea detectado.

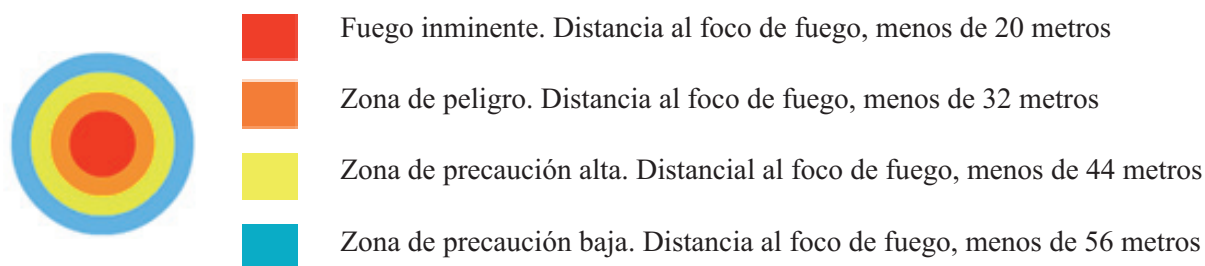


Fig. 12. Representación gráfica de un foco de fuego

De este modo, la unión de todos los focos de fuego que se detecten, dará lugar a la representación global del incendio, tal y como se muestra en la figura 13.



Fig. 13.. Representación gráfica del incendio

- Rango de visualización del fuego (ver figura 14): La pantalla del dispositivo móvil tiene unas dimensiones específicas, por lo que de cara a la representación del fuego, deberemos realizar un escalado en función del tamaño del incendio y de la distancia a la que se encuentre el tren del fuego.

Para controlar el escalado (zoom) de visualización del fuego, existen dos posibilidades:

**Zoom automático:** No es necesaria la intervención del usuario para su funcionamiento. Este zoom actúa atendiendo a la distancia del foco de fuego más alejado al tren con respecto al límite de visualización. Con este tipo de zoom se garantiza que la totalidad del fuego será visible, siempre y cuando no exceda el rango máximo de visualización. El zoom automático tiene un rango mínimo de visualización de 300 metros y un rango máximo de visualización de 500 metros.

**Zoom manual:** Esta es la posibilidad que se le da al usuario para que sea él quien decida la forma de visualizar el incendio. Si el usuario elige un tamaño de zoom inadecuado, la visualización total del fuego no será posible. El zoom manual tiene un rango mínimo de visualización de 100 metros y un rango máximo de visualización de 750 metros.

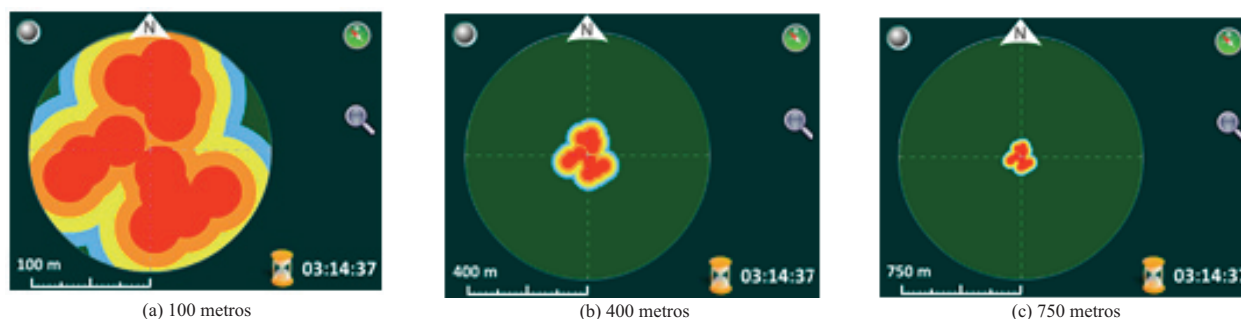


Fig. 14. Rango de visualización (zoom)

- Distancia al fuego más cercano: Aquellos nodos que detectaron la presencia de fuego en algún instante de tiempo y difundieron su localización, son almacenados en un array. Así mismo, el tren también conoce su posición, por tanto, se realizará una comparativa entre la posición que ocupa el tren y la posición de cada uno de los nodos almacenados en el array. De esta manera, mediante el Teorema de Pitágoras sabemos qué nodo de entre todos los que detectaron fuego, es el que está más cerca del tren en cada instante.

Una vez conocida la distancia al foco de fuego más cercano, tan solo queda restarle a esa distancia el radio de la circunferencia que determina la zona de precaución baja, que en este caso son 56 metros. De esta manera, se obtiene la distancia al borde del fuego. Mirando la figura 15 la distancia al fuego más cercano al tren son 590 metros.

- Fuego fuera de los límites de visualización: Puede ocurrir que la representación gráfica del fuego exceda el límite de visualización, es decir, el tren está a una distancia demasiado grande del foco de fuego más cercano por lo que no es posible visualizar el incendio. La manera de resolver esta circunstancia es sencilla. Partiendo de que se conoce la localización del tren, así como la posición del foco de fuego más cercano a él, se podrá indicar mediante una flecha roja, la dirección que debería seguir el tren para encontrar el fuego más próximo (ver figura 15).

- Ubicación del área segura más cercana: Ante la imprevisibilidad de un incendio, se pueden producir situaciones en las que el tren puede verse rodeado por el fuego, por lo que es de vital necesidad facilitar la ruta de escape más próxima para garantizar la seguridad de los operarios y pasajeros del tren.

Partimos de que el tren se encuentra posicionado en el interior de la zona representada por el incendio. Seguidamente realizaremos una comprobación pixel por pixel de la zona acotada por el incendio y una vez finalizada la comprobación, sabremos qué pixel, que no sea de algún color que identifique la presencia de fuego, es el más próximo al tren y por tanto se podrá establecer a qué distancia y en qué dirección apuntar para llegar al área segura. Mirando la figura 16 la distancia al área segura más cercana al tren está a 80 metros en la dirección que indica la flecha verde.

- Geolocalización: Una de las nuevas funciones que nos ofrece Adobe AIR 2 es la de poder crear aplicaciones GPS o aplicaciones que empleen la ubicación del dispositivo para ofrecer contenido personalizado basado en la localización. Para ello el dispositivo en el cual se instale la aplicación móvil deberá disponer de GPS así como del suficiente grado de cobertura para poder utilizar esta funcionalidad.

No obstante, de cara a la simulación y para aquellos dispositivos que no dispongan de GPS, utilizaremos las coordenadas que nos indique la pantalla de simulación del tren. De este modo, en nuestra aplicación móvil se mostrará exactamente la misma posición y orientación que posea el tren en el visualizador de área (ver figura 16).

- Brújula: La orientación del tren quedará reflejada en la interfaz a través de una brújula integrada en la aplicación, de tal forma que cuando el tren realice un giro en el escenario (vía en curva), la interfaz interpretará ese giro y realizará la reorientación oportuna en la brújula para que apunte en la dirección correcta (ver Figura 16).

- Sonido de alarma de incendio: Cada vez que un nuevo foco de fuego sea detectado, se producirá un pitido, lo cual advertirá al operario del tren de que el incendio ha evolucionado.

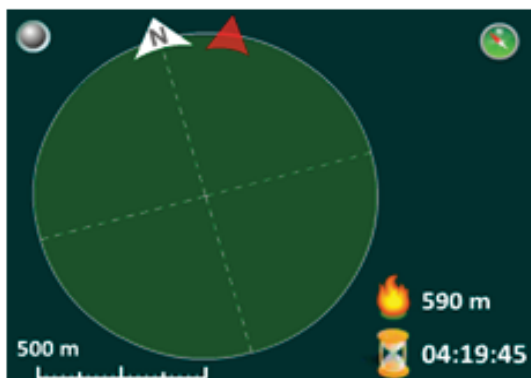


Fig. 15. Implementación de la interfaz I

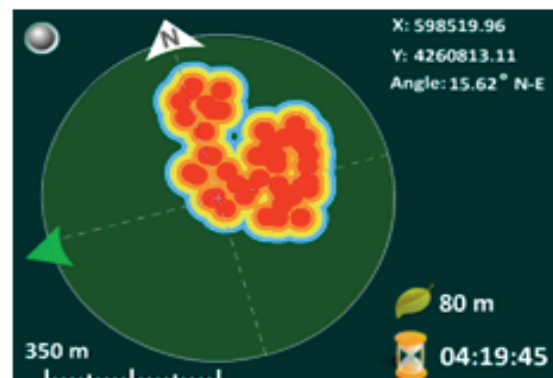
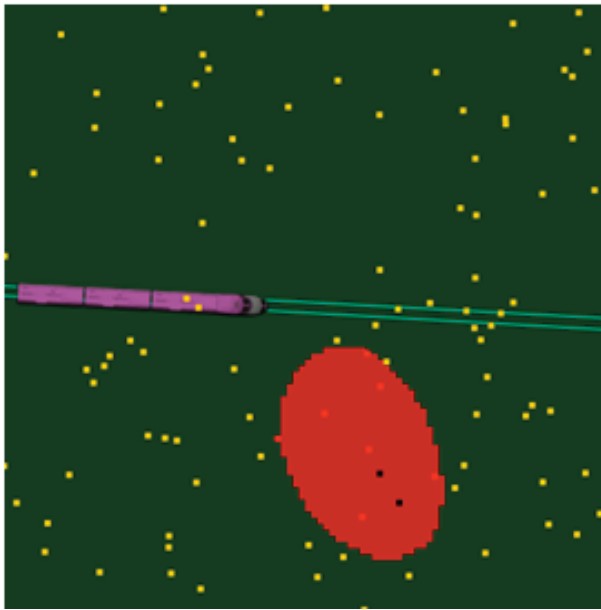


Fig. 16. Implementación de la interfaz II

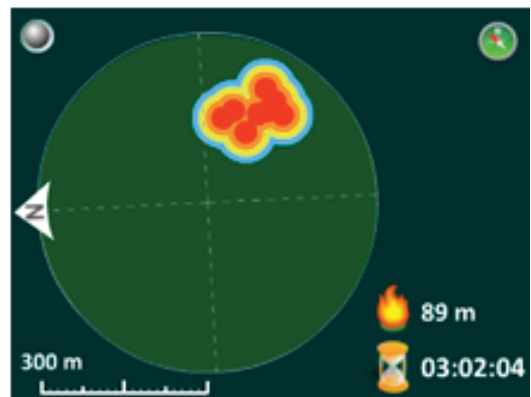


#### 4. Resultado final

Tras haber analizado las diferentes funcionalidades que ofrece la interfaz de usuario y la manera en la que están implementadas, ha llegado el momento de comprobar el resultado final del proyecto empleando para ello una situación simulada. Esto nos servirá para hacernos una idea sobre la manera en la que se muestran los datos en la interfaz incorporada en la aplicación móvil.



En el ejemplo de la figura 17 se simula en FARSITE un incendio de fisonomía sencilla y un único punto de origen del fuego. Se realiza un despliegue aleatorio de 100 nodos en una zona de tamaño 401x401 metros.



*Fig. 17. Ejemplo del funcionamiento de la interfaz*

Finalmente en la figura 18 se muestra la situación real de la interfaz tal y como la vería el operario del ferrocarril.



*Fig. 18. Interfaz en la cabina del tren*

## 5. Conclusiones

EIDOS es un sistema innovador para I+D+I dentro de un plan de impacto medioambiental con aplicación en la detección y televigilancia de incendios en las proximidades de la red ferroviaria. EIDOS puede viajar perfectamente a bordo de cualquier tren y complementar el sistema de supervisión a distancia mediante una pequeña pantalla incorporada en el panel de mando y control de la cabina del maquinista donde se reciben los avisos de incidencias en la marcha.

Un incendio en el ámbito de la infraestructura ferroviaria o su entorno, es un fenómeno que puede resultar muy peligroso para los trenes que circulan en sus proximidades. Anticiparse a su detección inmediata, mediante la tecnología EIDOS, es anticiparse a la resolución del problema.

Al igual que un incendio no respeta las fronteras, la tecnología EIDOS es exportable, siendo de aplicación en cualquier red europea de transporte ferroviario, pudiendo incluso cruzar fronteras entre distintos países sin que eso suponga mayor inconveniente.

EIDOS pretende exportar calidad con experiencia y buenas prácticas medioambientales, contribuyendo con la ciencia de las aplicaciones en Tecnologías de la Información y la Comunicación e Innovación Tecnológica.

## 6. Bibliografía

- [1] H. Karl and A. Willig. *Protocols and Architectures for WSN*. Wiley (2005).
- [2] S. N. Simić and S. Sastry. *Distributed localization in wireless ad hoc networks*. University of California at Berkeley, Technical Report No. UCB/ERL M02/26 (2002).
- [3] A. Galstyan, B. Krishnamachari, K. Lerman, and S. Patten. *Distributed online localization in sensor networks using a moving target*. In *Proceedings of the International Symposium of Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04)*, 2004.
- [4] F. J. Ovalle-Martínez, A. Nayak, I. Stojmenovic, J. Carle, and D. Simplot-Ryl. *Area-based beaconless reliable broadcasting in sensor networks*. *International Journal on Sensor Networks*, vol. 1(1/2), pp. 20–33, 2006.
- [5] Adobe Flash Professional CS5. *Classroom Book*. Adobe Systems Incorporated (2010).
- [6] Colin Moock. *Essential ActionScript 3.0*. O'Reilly (2007).
- [7] Adobe AIR. Disponible en <http://www.adobe.com/es/products/air/>
- [8] Albert Lukaszewski. *MySQL for Python*. Packt (2010).



La revista Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria es una publicación científica digital con versión impresa que pretende acoger los artículos que dan a conocer resultados de investigaciones, estudios o desarrollos relevantes en el ámbito del transporte en general y del ferrocarril en particular.

**febrero 2012**  
**número 3**

**Ingeniería inversa de las estructuras triangulares y del Talgo I**

**Estudio de repercusiones de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad en obras de permeabilización de la red ferroviaria de interés general española**

**Estimación del consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> en trenes de mercancías y análisis de la variabilidad**

**Instalación para el estudio de la propagación de ondas de presión en conductos y su aplicación en túneles para trenes de alta velocidad**

**Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes**

**Estrategia para el mantenimiento de una LAV durante 20 años**

**Configuración e implantación del sistema ERTMS/ETCS Nivel-1 en el tramo entre Plaza España-Martorell Enllaç de la línea Llobregat-Anoia de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya**

**Ventajas de la participación pública en el estudio de alternativas de trazados ferroviarios**

**Alta velocidad y desarrollo urbano. 30 años de experiencias**

**Locomotora Naval 1322 de FEVE. Reforma, funcionamiento, prestaciones**

**Sistema EIDOS**



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

[www.ffe.es](http://www.ffe.es)

Número 3. Monográfico con los trabajos galardonados en el "I Premio Tria Railway RD para Jóvenes Ingenieros Ferroviarios"

