



Análisis del cruce entre trenes de alta velocidad y de mercancías en líneas con tráfico mixto desde el punto de vista aerodinámico

Marta Jiménez Cobo



- **Aplicación de resortes espirales a torsión en materiales compuestos como almacenamiento de energía en el sector ferroviario**
Daniel Fernández Caballero, Manuel Esperón Miguez, Víctor Rodríguez de la Cruz
- **Optimización de la Política de Reperfilado de Ruedas para el Citadis 302, en la explotación de Metro Ligero Oeste**
María Victoria Alba Díaz
- **Diseño Operativo, Comercial y Económico del Tren Turístico**
Verónica Álvarez Fernández
- **Extensión del ancho UIC a Zaragoza para trenes de mercancías**
Eduardo Palacín Biarge
- **Sistema de Conducción Automática de Trenes (ATO), para la Línea – 4 del FC Metropolità de Barcelona**
Montserrat Artigas Palomeque, Pau Picas Martínez
- **Sistema Bayesiano de Localización de Trenes Basado en Medidas GNSS y Sensores Inerciales**
Omar García Crespillo

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



Edita:



Consejo asesor:

Rosa Isabel Aza Conejo
Autoridad Portuaria de Gijón

Ignacio Barrón de Angoiti
Unión Internacional de Ferrocarriles

José Vicente Colomer Ferrándiz
Universidad Politécnica de Valencia

Paulo Fonseca Teixeira
Universidade Técnica de Lisboa

Julio Fuentes Losa
Universidad Nacional de Educación a Distancia

Ernesto García Vadillo
Universidad del País Vasco

Andrés López Pita
Universidad Politécnica de Cataluña

Ricardo Insa Franco
Universidad Politécnica de Valencia

Andrés Monzón de Cáceres
Universidad Politécnica de Madrid

Juan Miguel Sánchez García
Ministerio de Fomento

Miguel Rodríguez Bugarín
Universidad de A Coruña

Juan José Montero Pascual
Universidad Nacional de Educación a Distancia

José María Menéndez Martínez
Universidad de Castilla-La Mancha

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.

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
ISSN: 2174-0194

El número 9 de la revista *Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria* recoge los trabajos galardonados en el "III 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 el curso académico 2013-2014. A esta edición del premio concurrieron 10 trabajos. El jurado, de acuerdo con las bases de la convocatoria, escogió el primer premio, entendiéndolo que el resto de los trabajos, 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 Andrés López Pita y formaron parte del mismo como vocales, José Luis López Gómez, Javier Romero, Pilar Martín Cañizares e Ignacio González.

Índice

Análisis del cruce entre trenes de alta velocidad y de mercancías en líneas con tráfico mixto desde el punto de vista aerodinámico	7
Marta Jiménez Cobo <i>Siemens Rail Automation</i>	
Aplicación de resortes espirales a torsión en materiales compuestos como almacenamiento de energía en el sector ferroviario	19
Daniel Fernández Caballero, Manuel Esperón Míguez, Víctor Rodríguez de la Cruz <i>Universidad Politécnica de Madrid (Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales)</i>	
Optimización de la Política de Reperfilado de Ruedas para el Citadis 302, en la explotación de Metro LigerO Oeste	29
M ^a Victoria Alba Díaz <i>Universidad Pontificia de Comillas (ICAI)</i>	
Diseño Operativo, Comercial y Económico del Tren Turístico	39
Verónica Álvarez Fernández <i>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</i>	
Extensión del ancho UIC a Zaragoza para trenes de mercancías	53
Eduardo Palacín Biarge <i>INECO (Gerencia de Área de Premantenimiento y Tecnología)</i>	
Sistema de Conducción Automática de Trenes (ATO), para la Línea - 4 del FC Metropolità de Barcelona	65
Montserrat Artigas Palomeque, Pau Picas Martínez <i>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</i>	
Sistema Bayesiano de Localización de Trenes Basado en Medidas GNSS y Sensores Inerciales	75
Omar García Crespillo <i>Universidad de Málaga (Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, E.T.S.I. Telecomunicación)</i>	



Papers

Study of Aerodynamics problem resulted when high speed trains pass freight trains on mixed traffic lines 7

Marta Jiménez Cobo

Siemens Rail Automation

Abstract: Nowadays, there is no regulation for a high speed passenger train passing a freight train on a mixed traffic line. This article analyses this problem from an aerodynamic point of view, studying the loads and moments generated from both tunnel and open air situations. This analysis is intended to provide knowledge from a theoretical perspective and also from an experimental perspective where results were obtained from tests implemented on the track. As a result of the research, several contributions have been suggested in order to ensure a safe circulation with both types of trains in coexistence.

Keywords: High speed, freight train, mixed traffic, aerodynamic, crossing event.

Use of composite torsion spiral springs in railway energy storage 19

Daniel Fernández Caballero, Manuel Esperón Míguez, Víctor Rodríguez de la Cruz

Universidad Politécnica de Madrid (Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales)

Abstract: Energy supply requires effective and also efficient techniques in production, transport and final use. In last years so many energy storage systems have been developed. Major advances in the field of composite materials; show that it can be possible the energy storage by the elastic deformation of a torsion spiral spring.

An analytical model is generated to study the different variables affecting the length of the spring strip that can be free or blocked either in the housing or in the shaft. Design parameters are strip length, variation of curvature of the spiral, relation between curvature of shaft and housing and variation of bending stiffness along the spring strip length. There is also a particular design case with a clothoid strip and a linear variation in bending stiffness throughout the length of the strip that leads an analytical torqueshaft rotation curve. According to the application of the spiral spring, different torque angle characteristic curves are required, so a design process has been developed.

Different torsion spiral springs have been constructed and tested to validate the models. They have been manufactured with fiberglass composite and epoxy matrix. Test benches have also been constructed to validate the model. Tests carried out validate the analytical model with considerable accuracy. This work also analyses the optimization of spiral spring weight. Different materials, resistive section shape and serial and parallel configurations are studied to improve it.

There is also a specific work about the electromechanical and electric integration of the torsional spring in a railway system. Simulations about energy flow and energy storage load and down load have been carry out.

Keywords: Torsional spiral spring, composite materials, energy storage.

Optimization of the wheel truing approach for the Alstom Citadis 302, in the West Light Rail network 29

M^a Victoria Alba Díaz

Universidad Pontificia de Comillas (ICAI)

Abstract: The aim of this paper is to provide the development of an optimized wheel truing approach for the fleet of Alstom tramways in the West Light Rail network.

This new policy of tread maintenance has been designed to increase the wheels lifecycle and to assure the fulfillment of the safety requirements established by the manufacturer. It includes an intermediate measure of the wheel parameters with a laser device to evaluate the state and therefore, carry out a predictive maintenance instead of preventively. In addition this approach redefines the wheel critical parameters and the periodicities of the associate tasks of maintenance.

Keywords: Railway wheels, tread maintenance, truing, Citadis.



Operational, Commercial and Economic Desing of Tourist Train Train and Breakfast Camino de Santiago 39

Verónica Álvarez Fernández

Diseño y Gestión de Proyectos, EPSEVG, Vilanova i la Geltrú

Abstract: The project “Operational, Commercial and Economic Design of Tourist Train “Train and Breakfast Camino de Santiago”, approaches the study of the creation of a new rail product, conceived and designed in order to establish and promote a tourism and transport combined offer, additional to the current, using the value that represents a rail journey and supplementing it with some existing tourism services and of great interest to the client.

A project combining commercial and technical aspects to address completely the development of a new rail product, not only defining and designing the product itself, but considering all operational factors that enable and make possible its immediate implementation and commissioning.

To sum up, a project that examines and defines the commercial, technical, operational, and economic processes necessary for the implementation of a new tourist-rail product, developed according to the requirements of the current market, and constituting an attractive, different and innovative product.

Keywords: Desing, Tourist Train, Train and Breakfast, St. James’way.

Extension of UIC gauge to Zaragoza for freight trains 53

Eduardo Palacín Biarge

Gerencia de Área de Premantenimiento y Tecnología, Ineco

Abstract: We intend to study possible options for allow, in the short term with a minimum investment, the operation of freight trains of 750m in UIC gauge to environment Zaragoza. It seeks to choose the best alternative, taking into account the interests of the infrastructure manager like as the interests of railway operator.

Keywords: Zaragoza UIC gauge, mixed gauge, freight trains.

Automatic Train Operation of trains, for the Line 4 of FC Metropolità de Barcelona 65

Montserrat Artigas Palomeque, Pau Picas Martínez

Escola Politècnica Superior d’Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (Barcelona)

Abstract: The Project developed consist about an improvement of the automatic train protection (ATP) currently working in the line 4 of Metro de Barcelona. This optimization will be obtained through the implementation of the ATO (Automatic Train Operation) system, which increases the efficiency of the braking curve when the train has to change of track circuit, avoiding acceleration jumps or brakes. In the case of the driver, manual conduction, he cannot regulate correctly the changes of velocity when is going to pass from a track circuit to another one with different velocity codes. In addition, it can obtain an increasing commercial velocity, a better traffic regulation of the trains and more stability of the interval between trains in the Line 4 from FMB (Ferrocarril Metropolità de Barcelona).

Keywords: ATO, Track circuit, ATP, ATS, ECA (Land Equipment ATO), CTC, FMB, DMI.



Bayesian Railway Localization System Based on Raw GNSS Measurements and Inertial Sensors 75
Omar García Crespillo

Instituto de Comunicación y Navegación, Centro Aeroespacial Alemán (DLR). Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad de Málaga

Abstract: Current railway localization systems rely on both track side and train side sensors, providing only a discrete positioning of the trains at a high cost in deployment and maintenance. On the other hand, Global Navigation Satellite Systems (GNSS) can provide a world-wide positioning at a lower cost since it requires only an antenna and a receiver on board. However, due to disadvantageous environments, the GNSS signals may get blocked and the use of additional sensor and information of the railway map is necessary to achieve a robust positioning. In this article, we propose a probabilistic localization system for trains using raw measurements from GNSS, inertial sensors and a digital railway map. The combination of these sensors in our algorithm can achieve a robust localization even in low visibility situations.

Keywords: Railway localization, Global Navigation Satellite System (GNSS), Inertial Measurement Unit (IMU), Bayesian estimation, particle filter.

Análisis del cruce entre trenes de alta velocidad y de mercancías en líneas con tráfico mixto desde el punto de vista aerodinámico

Study of Aerodynamics problem resulted when high speed trains pass freight trains on mixed traffic lines

Marta Jiménez Cobo

Ingeniero de Proyecto, Siemens Rail Automation, Chippenham, SN151JD, UK

Resumen

En la actualidad, el cruce de trenes de viajeros de Alta Velocidad y de mercancías convencionales en líneas con tráfico mixto carece de regulación. El presente artículo analiza esta problemática desde el punto de vista aerodinámico, estudiando las fuerzas y momentos que se generan tanto a cielo abierto como en túnel. A través de este análisis se pretende aportar conocimiento, no sólo a partir del análisis teórico, sino también a partir de los resultados experimentales obtenidos durante ensayos en vía. Como consecuencia de la investigación se proponen distintas medidas que contribuyan a asegurar una circulación segura de ambos tipos de trenes en coexistencia.

Palabras clave: alta velocidad, tren de mercancías, tráfico mixto, aerodinámica, cruce.

Abstract

Nowadays, there is no regulation for a high speed passenger train passing a freight train on a mixed traffic line. This article analyses this problem from an aerodynamic point of view, studying the loads and moments generated from both tunnel and open air situations. This analysis is intended to provide knowledge from a theoretical perspective and also from an experimental perspective where results were obtained from tests implemented on the track. As a result of the research, several contributions have been suggested in order to ensure a safe circulation with both types of trains in coexistence.

Keywords: High speed, freight train, mixed traffic, aerodynamic, crossing event.

1. Introducción

A diferencia de la habitual segregación de tráfico, las expectativas generadas alrededor del desarrollo del transporte ferroviario de mercancías han llevado a las distintas administraciones ferroviarias a plantearse un aprovechamiento “mixto” de estas líneas en los últimos años.

Sin embargo, el debate sobre la conveniencia o no de implantar líneas con tráfico mixto ha generado distintas controversias: ¿Es siempre posible la combinación de actividades de transportes de distinta naturaleza? ¿Es razonable? ¿Supone siempre una forma de mejorar el uso de la red? ¿Bajo qué condiciones?

Con carácter previo a cualquier otra consideración, conviene precisar este concepto, con el fin de evitar confusiones en torno a este tipo de tráfico. En el presente artículo se tratará como línea de Alta Velocidad (en adelante, LAV) mixta aquella preparada para tráfico mixto de trenes de viajeros (de 250 a 350 km/h) a la par que trenes de mercancías convencionales, es decir, con carga por eje hasta 22,5 o 25 toneladas y velocidades generalmente hasta 100 o 120 km/h. No será aplicable, por tanto, al transporte de mercancías ligeras en trenes más rápidos, con menor carga por eje y que por tanto pueden circular por LAV exclusivas para viajeros. De igual forma se han excluido aquellos casos de transporte de mercancías peligrosas.

2. Conveniencia y viabilidad de la explotación mixta en líneas de alta velocidad

2.1. Oportunidad y necesidad del tráfico mixto

Esencialmente, la operación mixta en este tipo de infraestructuras ha sido justificada desde el punto de vista de optimización de la capacidad, ya que es sabido que ésta se maximiza cuando todos los trenes circulan por el tramo de línea en cuestión a la misma velocidad, es decir, en surcos horarios paralelos (a igualdad de los demás factores). No obstante, la coexistencia de trenes de mercancías y viajeros sobre la misma infraestructura ofrece una alternativa a la explotación de estas líneas.

Se han realizado múltiples estudios relacionados con la justificación de este tipo de explotación de los cuales han resultado casos concretos en los que parece conveniente la operación mixta.

En el caso concreto de España, el principal beneficio aparece ligado al aumento de competitividad del transporte de mercancías, dando respuesta a la baja interoperabilidad existente de las infraestructuras españolas con respecto a las infraestructuras ferroviarias del resto de Europa. El uso del ancho de vía ibérico (1668 mm) ha obstaculizado siempre el transporte de mercancías internacionales, derivado de su disparidad respecto al ancho estándar (1435mm) empleado tanto en las líneas francesas como en la mayoría de los países europeos e incluso nuevas líneas de Alta Velocidad españolas.

Asimismo, en ciertos casos la circulación de trenes de mercancías y viajeros por una misma línea permite prescindir de otra línea de trazado paralelo, lo que a priori se traduce en una disminución de los costes asociados al mantenimiento que necesitarían ambas en coexistencia, como se recoge en varias de las publicaciones de López Pita.

2.2. Inconvenientes técnicos y económicos derivados del tráfico mixto

Desde que se viene valorando la posibilidad de explotar en condiciones mixtas las LAV, se han ido estudiando los distintos retos técnicos que conlleva el uso de estas líneas por composiciones de velocidades y cargas tan dispares.

La mayoría de las administraciones de los distintos países han publicado ya diversos análisis que abordan temas como la repercusión de la capacidad de la línea, los aspectos referidos a la vía y su trazado o los riesgos ligados a posibles invasiones de galibo. Sin embargo, existen muy pocos estudios referidos a los efectos aerodinámicos producidos durante el cruce de trenes de estas características. A elevadas velocidades relativas

y/o del tren más rápido pueden producirse acciones aerodinámicas entre los trenes cuya magnitud y efectos no están suficientemente estudiados. Evidentemente, el estudio de los efectos de las fuerzas aerodinámicas en túneles carecerá de sentido desde el punto de vista del cruce en infraestructuras bitubo así como en aquellos casos de vía única puesto que no existirán efectos directos sobre el tren paralelo.

3. Problemática del cruce de trenes de viajeros con trenes de mercancías convencionales

En la actualidad no existen procedimientos técnicos ni funcionales que permitan regular el cruce de trenes de Alta Velocidad y de mercancías. La complejidad de los fenómenos aerodinámicos que se manifiestan tanto en plena vía como en túnel dificulta la normalización del cruce. Por el momento, se han establecido ciertas soluciones muy conservadoras, tales como la prohibición del cruce de trenes de mercancías y trenes de Alta Velocidad así como la reducción de velocidad de los trenes de viajeros al aproximarse al cruce con el tren de mercancías. Sin embargo, la adopción de ambas medidas ha resultado en una disminución de la capacidad y por tanto una pérdida en las ventajas derivadas de este tipo de explotación.

3.1. Introducción a la aerodinámica de trenes

Los fenómenos relacionados con la aerodinámica son consecuencia del movimiento relativo del aire y el tren y se presentan especialmente en presencia de altas velocidades, ya que dependen principalmente de la velocidad del tren. A medida que ésta se incrementa, los efectos derivados de las fuerzas aerodinámicas en su alrededor también crecen. Estas fuerzas pueden tener un efecto negativo sobre un tren que pudiera adelantar o cruzarse en sentido contrario, teniendo claros efectos sobre la seguridad en la circulación.

En las velocidades operativas del tren, el aire se considera incompresible (se desprecian los cambios de densidad) de manera que se comporta de manera similar al agua y es clasificado como un fluido. Cuando un tren se introduce en un fluido, experimenta fuerzas y momentos procedentes del movimiento relativo del tren y el aire conocidas como fuerzas aerodinámicas. De manera general, estas fuerzas aerodinámicas dependen de la velocidad de circulación del tren, la velocidad local del viento y sentido del mismo, la geometría y sección lateral del vehículo y la situación espacial.

No obstante, a la hora de analizar las cargas aerodinámicas en los trenes de Alta Velocidad, conviene distinguir entre aquellas que actúan directamente sobre el vehículo generadas por su desplazamiento y por vientos transversales, y cargas aerodinámicas que el propio tren genera sobre su entorno

Fuerzas que actúan sobre el vehículo: Resistencia al avance

Entre las cargas que actúan sobre el propio vehículo, la fuerza que sufre el tren contra el aire en ese eje se denomina resistencia aerodinámica al avance, conocida como la fuerza longitudinal que se opone al movimiento del tren como consecuencia de la interacción entre el tren y el aire circundante con el que choca y que lo envuelve.

La resistencia al avance se expresa, de forma simplificada para circulaciones en cielo abierto, como:

$$R_A = -(A + B \times V + C \times V^2) \quad (1)$$

Dónde:

- R_A es la resistencia al avance en recta, que se expresa normalmente en daN.
- V es la velocidad del tren, expresada normalmente en kilómetros por hora (km/h).
- A , B y C son coeficientes que dependen de las características del material rodante que se miden, respectivamente, en daN, daN/(km/h) y daN/(km/h)².

En el caso que nos ocupa, el último término es el que tiene una mayor contribución ya que se refiere a la resistencia aerodinámica de presión y fricción, independiente de la masa del tren y relacionado con la densidad del aire.

Por un lado, la resistencia **aerodinámica de presión** es la proyección en la dirección del movimiento de la resultante de las fuerzas de presión que actúan sobre la superficie del cuerpo. Depende fundamentalmente de la sección transversal y de la forma de la cabeza y cola del tren. También depende de los aparatos situados en el techo del vehículo y de los bogies

Por otro, la resistencia **aerodinámica de fricción** es debida a la viscosidad del aire, y depende fundamentalmente de la superficie mojada del cuerpo (entendiendo por tal la superficie con la que fricciona el aire y de su continuidad y rugosidad superficial).

Fuerzas que actúan en el entorno del vehículo

Como consecuencia del flujo de aire que rodea al tren, se producen fuertes presiones aerodinámicas sobre su entorno, cuya magnitud dependerá de la región en la que nos encontremos siendo posible diferenciar entre aquellas presiones que se generan alrededor de la cabeza del tren, las producidas a lo largo del mismo y las correspondientes a la parte trasera.

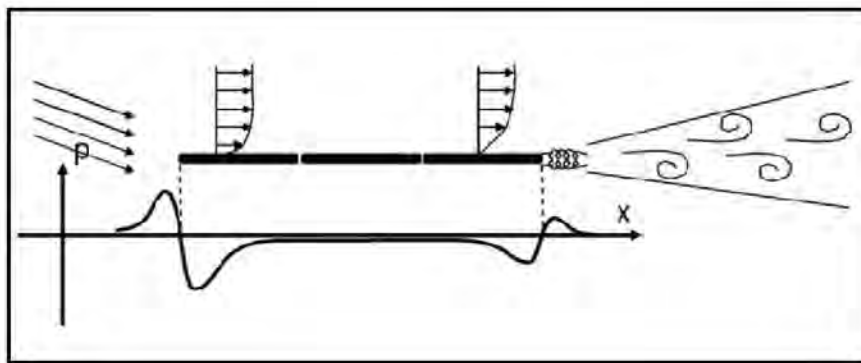


Fig. 1. Distribución de presiones en las regiones de flujo inducido
Fuente - Weise, Schober, & Orellano, 2006

Se observa que las zonas con mayores presiones son aquellas cercanas a la cabeza del tren, mientras que el resto son dominadas por el "efecto estela".

Entre los principales parámetros que afectan a la magnitud de las ondas de presión, se encuentran:

Velocidad del tren más rápido, siendo la duración del pulso de presión inversamente proporcional a las velocidades relativas entre ambos trenes. En concreto, (Gawthorpe, 1978) demuestra uno de los aspectos más importantes a considerar en el cruce de trenes: “La amplitud de la onda de presión que induce el tren más rápido sobre el tren más lento depende únicamente de la velocidad del tren que adelanta, la geometría de la cabeza y la distancia entre ambos trenes, pero no de la velocidad del tren que está siendo adelantado”. De esta forma se confirman las consideraciones realizadas en el reciente proyecto de investigación de Adif, en el cual se ha estimado que la magnitud de las cargas aerodinámicas es relativamente poco dependiente de la velocidad del tren más lento.

Geometría, cuya influencia fue estudiada por (Railway Technical Research Institute, 1996), observando cómo para diseños más largos de la cabeza se reducía el gradiente de presiones. Las

cabezas con formas más afiladas pueden llegar a producir presiones cuya magnitud podría ser hasta el 50% menor que en aquellos trenes con una cabeza más tosca. Asimismo, uno de los parámetros más sensibles de la geometría del tren respecto a las fuerzas aerodinámicas laterales es el radio techo-lateral.

Sección transversal del tren, del tren, la cual no sólo tiene una influencia directa sobre los coeficientes de resistencia al avance anteriormente mencionados sino que la onda de presión inducida en el cruce de dos trenes es, en ciertos rangos, proporcional al área transversal de los vehículos que intervienen.

Viento cruzado, cuyos efectos dependen principalmente del ángulo de incidencia y el sentido de movimiento del tren. La componente resultante del aire produce una fuerza lateral y un momento de balanceo y guiñada que crean una distribución de presiones no simétrica.

Distancia entre el vehículo y la vía, debido al flujo turbulento que se produce en los bajos del tren así como la interferencia con los salientes del tren que inducen también en el aire una corriente.

Distancia entre los trenes que cruzan, siendo recomendable incrementar el entreeje a valores mayores que los comunes utilizados en infraestructuras dedicadas exclusivamente a viajeros.

En ocasiones los trenes de mercancías presentan cargas, puertas o toldos fuera de gálibo, pudiendo producirse desprendimientos de la carga o descarrilamientos. En estos, casos, cuanto mayor sea la distancia entre los ejes de las dos vías que forman la vía doble, menor será la probabilidad de colisión o de impacto físico o aerodinámico.

3.2. Influencia del entorno

El entorno tiene una importancia considerable en la evaluación del cruce, ya que los problemas aerodinámicos que ocurren durante los cruces en túneles tienen una mayor complejidad que aquellos que surgen a cielo abierto.

Hay dos aspectos fundamentales que diferencian la circulación al aire libre de la de en túnel. El primer aspecto tiene que ver con la resistencia al avance ya que durante la circulación por el interior del túnel se alcanzan valores significativamente mayores en túneles, obedeciendo a la expresión:

$$R_A = -(A + B \times V + T \times C \times V^2) \quad (2)$$

siendo T el factor de incremento de resistencia aerodinámica, el cual depende de la longitud del tren y de la longitud del túnel, siendo casi independiente de la velocidad del tren.

El segundo aspecto viene relacionado con la presión en cada punto de la superficie. Mientras que para un tren que circula al aire libre se puede pensar a grandes rasgos en un régimen estacionario, la situación en túnel es muy diferente. Cuando la cabeza de un tren entra en un túnel, el aire que se encuentra a la entrada se comprime creando una onda de presión que se propaga a lo largo del mismo a la velocidad del sonido. Esta onda al llegar a la boca de salida del túnel se refleja como onda de depresión en dirección a la boca de entrada. Por otra parte, cuando la cola del tren entra en el túnel, se produce una caída de presión (onda de depresión) que también se propaga hacia la cabeza del tren a la velocidad del sonido, reflejándose como onda de presión cuando alcanza la salida.

Por consiguiente, teniendo en cuenta que la presión en cada punto de la superficie del tren no es constante durante la circulación en túnel, se ha considerado que se trata de un problema transitorio.

Para poder cuantificar las variaciones de presión en un túnel de sección uniforme, los principales parámetros a considerar son las características del tren y las del túnel. Sin embargo, para el caso de un túnel de doble vía, la complejidad de las presiones se puede incrementar por la existencia de un segundo tren en sentido contrario.

Por tanto, a estos parámetros, hay que añadir las características del segundo tren y el tiempo de desfase de su entrada respecto al primero.

A continuación se observan las diferencias entre las distribuciones de presión para los casos de circulación en cielo abierto y túnel (Comisión Europea, Proyecto EU Transaero, 2002):

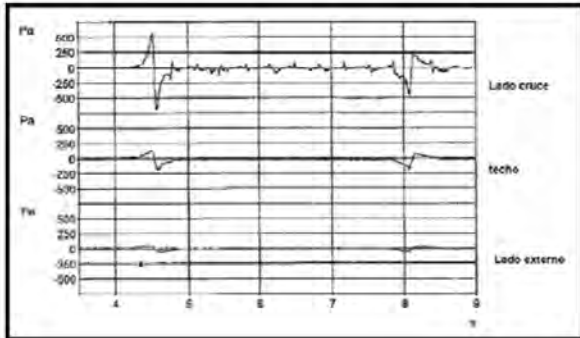


Fig 2. Cruce de un Etr 500 parado al aire libre con un segundo Etr 500 a 280km/h

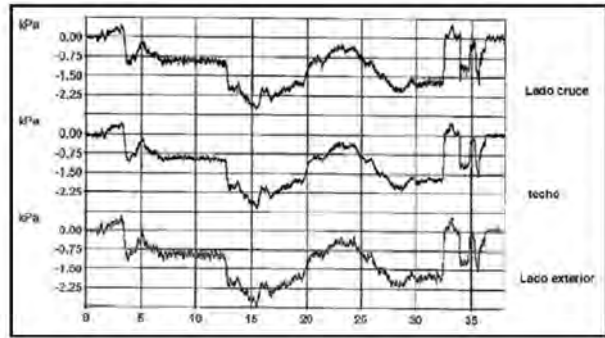


Fig 3. Cruce de un Etr 500 con otro Etr 500 a 280km/h en túnel

De las figuras previas se observa como para circulaciones a cielo abierto, aparece un efecto importante en el lado activo del cruce, siendo prácticamente nulo en el otro extremo. En cambio, en el caso de circulación en túnel las variaciones de presión son similares en ambos laterales del tren.

3.3. Descripción del fenómeno de cruce de trenes

El problema que se atribuye a los trenes que se cruzan se hace más complejo por la necesidad de simular el movimiento relativo de los dos trenes y la amplia variedad de parámetros que afecta a las cargas del contenedor y su respuesta. Este hecho requiere un gran análisis matricial para definir la relación entre las condiciones de operación y la carga así como los efectos dinámicos de estas. Una aproximación sensata para el estudio de estas cargas es usar un análisis CFD (Computational Fluid Dynamics) que permita analizar varios escenarios.

Una vez que se analizan los escenarios posibles a través de herramientas CFD es importante justificar la validez del modelo de simulación, lo que requiere comparar los resultados con experimentos realizados a escala real en campo incurriendo en un coste económico considerable.

A la hora de analizar el cruce se han adoptado las siguientes consideraciones generales:

- En vista de que el estudio sólo pretende abordar consideraciones aerodinámicas, se ha aceptado que los resultados expuestos no se ven afectados a priori por la respuesta dinámica, asumiendo que los pequeños movimientos de respuesta del tren de mercancías no afectarán el valor de las cargas aerodinámicas.
- En consonancia con la hipótesis anterior, los estudios aerodinámicos no consideran la influencia de la infraestructura (por ejemplo, irregularidades de vía), siendo necesaria su posterior evaluación desde la perspectiva dinámica para completar el estudio.
- En principio, la velocidad del tren de mercancías no tiene una repercusión significativa en la magnitud de las cargas aerodinámicas. En efecto, ciertos ensayos realizados en Italia al respecto demostraban que los esfuerzos a los que están sometidos los vagones son poco dependientes de la velocidad del tren de mercancías, dependiendo esencialmente de la velocidad del tren de Alta Velocidad (Lozano, 2010).

- A lo largo de la evaluación de las presiones generadas, las cargas longitudinales y verticales en el vagón de mercancías permanecen pequeñas y podrían no considerarse durante el movimiento completo del vagón.

Desde un punto de vista teórico, se han analizado las cargas según se recoge en la ficha de la UIC779-1. En general, con el paso de un tren se crea una onda de presión – depresión del aire que se desplaza con el tren. Este campo de presiones que se ejerce sobre cualquier superficie paralela dependerá de múltiples parámetros como se recoge en el apartado 3.1 del presente artículo.

Las presiones que se producen (q_{1k}) sobre un elemento vertical paralelo a la vía, son función de la distancia (ag), el coeficiente de forma del tren (k) y la velocidad del tren a través de la fórmula:

$$q_{1k} = k \cdot c_p (V/3.6)^2 \times (1/1600) \text{ siendo } c_p = 25 / (ag + 0.25)^2 + 0.02 \quad (3)$$

Durante el análisis de varias simulaciones CFD se ha observado que el valor de las fuerzas aerodinámicas alcanza su valor máximo cuando la parte delantera del tren de Alta Velocidad alcanza el tren de mercancías cayendo bruscamente al paso de los laterales del tren resultando una **fuerza lateral de atracción y repulsión**. Seguidamente, el tren de mercancías se cruza con la cola del tren de Alta Velocidad y vuelve a aparecer una interacción aerodinámica entre ambos, siendo en este caso un pulso de presión inverso y magnitudes ligeramente inferiores.

Es por ello que **será el pulso de presiones producido por la cabeza el que determinará las condiciones del cruce ya que las presiones más altas se encuentran alrededor de la parte frontal del tren, mientras que en sus laterales se desarrolla una región de bajas presiones**. Además, a partir de la Fig4 se puede observar la aparición de pequeños picos de presión negativa relacionados con la geometría del tren de Alta Velocidad, en concreto con el espacio entre coches.

Por último conviene resaltar que entre los parámetros que influyen en las fuerzas aerodinámicas se han encontrado simulaciones en las que existe una clara influencia de la dirección del movimiento relativo de ambos trenes, a diferencia de las primeras consideraciones en las que se pensaba que la velocidad del tren de mercancías no tenía ninguna repercusión y por tanto se podía evaluar parado.

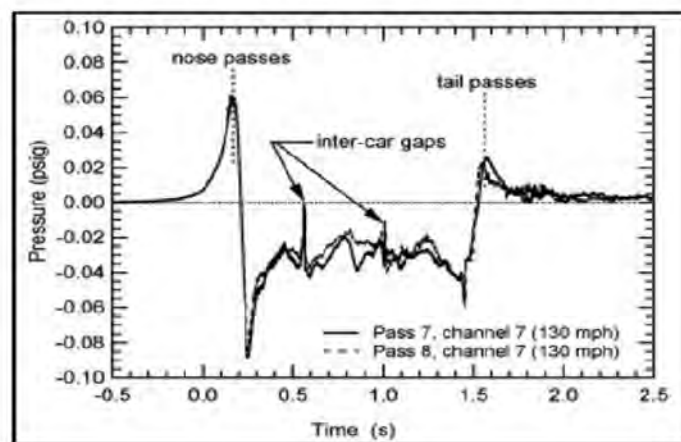


Fig 4. Presiones generadas por el tren de alta velocidad al cruzarse con el tren de mercancías.
Fuente - MacNeill, Holmes, & Lee, 2002

De la figura previa se puede observar la aparición de pequeños picos de presión negativa relacionados con la geometría del tren de alta velocidad, en concreto con el espacio entre coches.

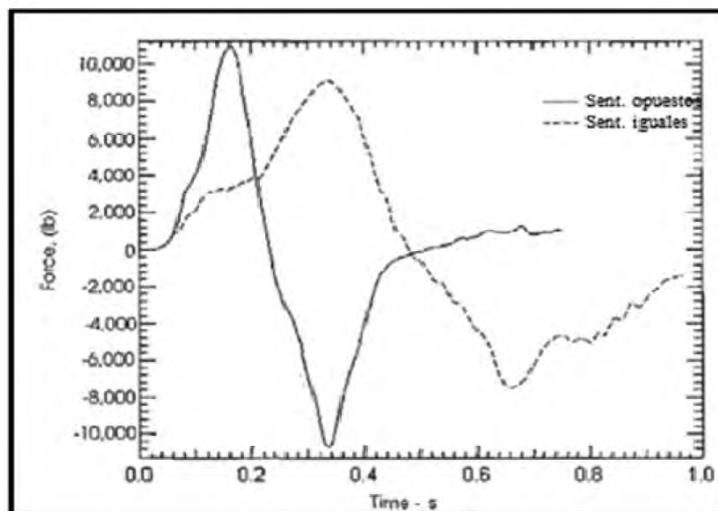


Fig 5. Presiones generadas por la cabeza del tren alta velocidad al cruzarse con el tren de mercancías según el sentido de cruce. Fuente - (FRA, 2002)

Cuando ambos trenes circulan en el mismo sentido, las fuerzas de interacción entre ambos se prolongan en el tiempo y el impulso se incrementa a pesar de que los valores más altos de carga puedan descender ligeramente. Aunque los resultados de las fuerzas son similares en ambos casos (trenes moviéndose en el mismo sentido o sentidos contrarios), la duración de las cargas se incrementa en proporción al tiempo de interacción. Por tanto, **la duración de la carga y del esfuerzo no dependen exclusivamente de la velocidad de los trenes sino que se encuentran estrechamente relacionados con los sentidos relativos de circulación de ambos trenes.**

En aquellos casos en los que los trenes de mercancías y los trenes de Alta Velocidad se mueven en el mismo sentido, la duración de la carga y el esfuerzo lateral se incrementa. Aunque el valor del pico de carga es ligeramente inferior a los casos en los que los trenes circulan en direcciones opuestas, el tiempo de contacto efectivo se extiende significativamente. Este intervalo de tiempo podría asociarse a una frecuencia y un modo de vibración inestable que deberá ser considerado en el análisis dinámico necesario para completar los resultados que se deriven del análisis aerodinámico.

4. Análisis del caso particular de la línea Barcelona- Figueres

4.1. Descripción del escenario

En Enero de 2013 entró en servicio el último tramo que faltaba para completar la línea de Alta Velocidad que conecta Madrid Barcelona y Figueres convirtiéndose en la primera línea de toda la historia de España en superar los principales obstáculos ibéricos: los seis pies castellanos en los Pirineos y la construcción de líneas exclusivas para viajeros en rutas que estaban muy lejos de alcanzar su techo de capacidad.

A la hora de analizar la línea, se han considerado los tramos a partir de Mollet, punto desde el cual la infraestructura ha sido diseñada con una rampa característica mucho más suave (18 milésimas), y es apta para soportar trenes con una carga máxima por eje de 22,5 toneladas. La razón de esta consideración en el diseño es obvia, ya que es en ese punto donde la línea recibe y expide los trenes de mercancías que usan la línea de ancho dual Puerto de Barcelona/Morrot-Can Tunis-Castellbisbal-Mollet.

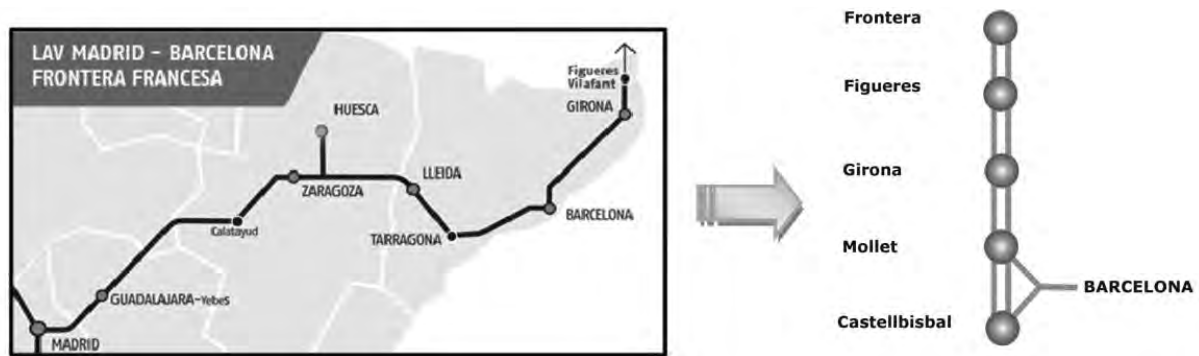


Fig 6. Esquema de la Línea Madrid-Barcelona-Frontera Francesa.

Fuente: Adif

Para este caso concreto, se han analizado teóricamente las presiones generadas durante el cruce a través de la fórmula mencionada anteriormente para el cálculo de presiones que en superficies verticales paralelas (3)

Así, comparando los valores para el corredor mediterráneo y la línea Barcelona-Figueras:

$$c_{pC.Mediterráneo} \cdot \left(\frac{V_{C.Mediterráneo}}{3.6} \right)^2 = c_{pLAVMAD-BCN-FF} \cdot \left(\frac{V_{LAVMAD-BCN-FF}}{3.6} \right)^2 \quad (4)$$

Así, suponiendo que la onda de presión incide sobre la pared de un contenedor estándar de ancho 2.5 m aproximadamente. y comparando los valores para el corredor Mediterráneo:

$$V_{LAVMAD-BCN-FF} = V_{C.Mediterráneo} \cdot \sqrt{\frac{c_{pC.Mediterráneo}}{c_{pLAVMAD-BCN-FF}}} = 200 \cdot \sqrt{\frac{0,29777778}{0,20261505}} = 200 \cdot 1,21230053 = 242,46 \text{ km/h}$$

Por tanto, un tren circulando a 242 km/h en la línea Madrid-Barcelona-Figueras donde la distancia entre ejes de las vías es de 4,70 m, produce una onda de presión equivalente a la de un tren que circula a una velocidad máxima de 200 km/h por una línea donde la distancia entre ejes de las vías es de 4 m, como el Corredor del Mediterráneo, donde la actual explotación de tráfico mixto se acepta como segura en base a la experiencia de 17 años de explotación sin incidencias relevantes.

Siguiendo este razonamiento se evalúan los valores de entreeje necesarios para distintas velocidades:

Tabla 1. Relación entreeje-velocidad máxima equivalente
Fuente - Elaboración propia

Entreeje (m)	Velocidad (km/h)
4,7	242,46
4,8	248,34
4,9	254,18
5	259,96
5,1	265,7
5,2	271,38
5,3	277,02
5,4	282,61
5,5	288,15
5,6	293,63
5,7	300

En ocasiones los trenes de mercancías presentan cargas, puertas o toldos fuera de gálibo, pudiendo producirse desprendimientos de la carga o descarrilamientos. En estos, casos, cuanto mayor sea la distancia entre los ejes menor será la probabilidad de colisión o de impacto físico o aerodinámico.

(García Álvarez, 2010) estudió la posibilidad de invasión de gálibo en aquellos casos que se produce descarrilo. En el supuesto de que se produjese hacia el interior de la vía doble, sería muy probable la colisión lateral del tren descarrilado con un tren que circulase en sentido contrario por la vía adyacente. Considerando las graves consecuencias que podrían derivarse de una situación de este tipo, resulta especialmente importante obtener un valor del entreje que, cuando un vehículo descarrilado hacia el lado interior de la vía doble se mueva con las ruedas guiadas por el interior del carril contrario, la caja del vehículo no llegue a invadir el gálibo de la vía adyacente. Así, (García Álvarez, 2010) demostró que este objetivo podría lograrse con valores de entreje de al menos 5,20 o 5,30 metros.

Teniendo en cuenta que la velocidad actual de los trenes de viajeros entre Mollet y Figueres oscila entre 225 km/h y 270 km/h, se deduce que un entreje de 5,2 m sería necesario para mantener el nivel de presiones actual del Corredor Mediterráneo, el cual se ha aceptado como seguro.

Para el caso de cruce de un tren de Alta Velocidad y un tren de mercancías dentro de un túnel, una consideración adicional y de extraordinaria importancia es la seguridad estructural de los vagones del tren de mercancías y/o la integridad del cargamento, lo que aún no se logrado regular normativamente. Generalmente, y ante la ausencia de soporte normativo homogéneo, cada fabricante tiene sus propios criterios de diseño en relación con las máximas solicitaciones de presión para las que se debe garantizar la resistencia estructural de los vehículos.

4.2. Plan de ensayos

Con el fin de contrastar los resultados obtenidos tras las simulaciones CFD, se han realizado ensayos experimentales en vía, para validar los modelos tanto a cielo abierto como en túnel.

La localización de los ensayos fue elegida por motivos logísticos. Así, los ensayos en cielo abierto se realizaron entre el PB de Llinars (PK 662,5) hasta el apartadero de Vilobí (PK 703,5), donde es posible alcanzar la velocidad máxima a ensayar. Para los ensayos en túnel se eligió el túnel de Sant Celoni (PK 669,7, con una longitud de 800 m y una sección libre de 108 m²), situando el tren de mercancías en la parte central del mismo.

La composición de los trenes de pruebas fue la siguiente:

- Una locomotora S/319, remolcando un vagón plataforma de la serie MMC, cargado con uno o más contenedores de distintas configuraciones (20 o 40 pies).
- Un automotor de la serie S/103.

Respecto a la instalación de los sensores, se optó por instrumentar tanto el tren de mercancías como la infraestructura con el fin de obtener resultados representativos. Así, tanto el campo de presiones inducido durante el cruce como la evolución temporal del mismo se registraron mediante sondas de presión instaladas en el exterior y en el interior del tren de mercancías mientras que el sistema de vía registraba los valores de posición y velocidad con el objeto de establecer un sincronismo con los valores obtenidos en el vagón.

Habiendo analizado previamente la baja dependencia de las presiones respecto a la velocidad del tren más lento y con objeto simplificar la ejecución de las pruebas y poder garantizar la repetitividad de las mismas, los ensayos se realizaron con el tren de mercancías parado. De esta forma, las mediciones se realizaron a partir de un número determinado de pasadas con el tren S103, para las cuales se establecieron los siguientes límites de velocidad:

¹ Los resultados recogidos en esta sección corresponden a las pruebas realizadas en túnel durante la noche del 12 mayo de 2013 en las cuales participó la autora del presente artículo acompañada de personal de Renfe y de Adif.

Tabla 2. Velocidades alcanzadas en los ensayos aerodinámicos.
Fuente - Elaboración propia

	11-12 de Mayo	18-19 de Mayo
Cielo abierto	180 km/h y 220 km/h	180 km/h y 220 km/h
Túnel	180 km/h y 200 km/h (2)	180 km/h y 200 km/h

Los ensayos confirmaron que las presiones registradas correspondían a los valores obtenidos durante la simulación pudiendo aumentarse aún más la velocidad sobre el amparo de la correspondiente consigna de pruebas, puesto que en este caso las velocidades máximas permitidas no superaban los 200 km/h en túnel y 220 km/h a cielo abierto.

5. Conclusiones

El presente artículo analiza aquellos factores que de una u otra manera inciden en la posibilidad de cruzar trenes de mercancías y trenes de Alta Velocidad en líneas con tráfico mixto.

Del análisis realizado, se puede concluir que el valor de las cargas que afectan en el cruce de trenes no viene determinado únicamente por la velocidad del tren más rápido, sino que la duración de la carga y del esfuerzo se encuentran estrechamente relacionados con los sentidos relativos de circulación de ambos trenes, siendo necesario evaluar el tren de mercancías en movimiento. Los ensayos realizados hasta el momento con el tren de mercancías parado serán de utilidad para validar las simulaciones CFD, sin embargo, **para poder sugerir una velocidad segura de cruce será necesario completar el estudio aerodinámico** con un análisis dinámico. Además, con el fin de establecer estos límites de la manera más precisa posible, **se recomienda la realización de ensayos en vía a velocidades superiores a las ensayadas que permitan obtener las condiciones óptimas de cruce**. La velocidad óptima de cruce será aquella que optimice el tráfico de viajeros y que sea compatible con la integridad del tren de mercancías, principalmente relacionada con las características de los vagones que conforman dicho tren. Por ello, **resulta imprescindible identificar los vagones previstos a circular en la línea y conocer su resistencia estructural**.

En cuanto al caso concreto de la línea Barcelona-Figueras teniendo en cuenta que la velocidad actual de los trenes de viajeros entre Mollet y Figueras oscila entre 225 km/h y 270 km/h, se ha deducido que un entreeje de 5,2 m sería necesario para mantener el nivel de presiones actual del Corredor Mediterráneo, el cual se ha aceptado como seguro a raíz de la experiencia. Sin embargo, considerando que la infraestructura ya está construida, y que por tanto las características constructivas de la línea son difícilmente modificables, parece razonable aceptar cruces con velocidades de hasta 200 km/h para trenes de viajeros en túneles o 220 km/h a cielo abierto. Para velocidades mayores a las indicadas, no existen ensayos experimentales publicados, por lo que su realización será ineludible para conocer la velocidad máxima permitida en términos de seguridad.

6. Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a Alberto García, Pilar Martínez y Ramón Morales por iniciarme en el mundo de la investigación y brindarme la oportunidad de aprender de los mejores. A mis padres, por apoyarme en todas mis decisiones y a Andres, por haber hecho todo el trabajo más fácil.

7. Referencias

- [1] Andersen, S. (1995). Zur Problematik des Mischbetriebes von Personen- und Güterzügen bei hohen Geschwindigkeitsunterschieden. [Problemática de la explotación mixta de trenes de viajeros y de mercancías en caso de grandes diferencias de velocidad] *Eisenbahntechnische Rundschau*, 44(5)
- [2] Federal Railroad Administration department of transportation research and special programs administration. (2002). Aerodynamic effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains.
- [3] Federal Railroad Administration department of transportation research and special programs administration. (1999). Assessment of potential aerodynamic effects on personnel and equipment in proximity to high-speed train operations.
- [4] García Álvarez, A., Barreiro Martínez, A. (2010). La electrificación ferroviaria cada vez más necesaria y eficiente. Análisis previo de la conveniencia y viabilidad de ubicación de los postes de electrificación en el centro de las vías dobles ferroviarias. *Revista Anales de mecánica y electricidad*, julio - agosto 2010.
- [5] López Pita, A. (2001). La explotación de líneas de alta velocidad en tráfico mixto: Experiencias disponibles y tendencias.
- [6] Macneill, R. A. (2002). Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains. *Proceedings of the IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, 57-64.
- [7] Weise, M., Schober, M., & Orellano, A. (2006). Slipstream velocities induced by trains. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, 1(6), 759-76



Aplicación de resortes espirales a torsión en materiales compuestos como almacenamiento de energía en el sector ferroviario

Use of composite torsion spiral springs in railway energy storage

Dr. Daniel Fernández Caballero

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid

Dr. Manuel Esperón Míguez

Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Dr. Ingeniería por la Cranfield University

Dr. Víctor Rodríguez de la Cruz

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid

Trabajo realizado en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha defensa del proyecto de investigación: 10.02.2014.

Fecha prestación a la convocatoria: 27.02.2014.

Resumen

Las necesidades energéticas actuales requieren una transformación de las técnicas eficaces en eficientes tanto en producción, transporte como consumo energético. Estas necesidades han impulsado nuevos desarrollos en el ámbito energético, entre los que se encuentran los sistemas de almacenamiento de energía. El avance en ingeniería de materiales hace pensar en la posibilidad del almacenamiento mediante deformación elástica de resortes espirales a torsión. Para ello es necesario estudiar metodológicamente en profundidad este tipo de resortes, así como las posibles vías de optimizar sus características.

Se realiza un análisis de los resortes espirales a torsión, como el elemento constitutivo básico del sistema de almacenamiento; estudiando los diferentes factores de influencia sobre su curva de comportamiento: longitud del fleje, geometría de la espiral de fabricación, variación de la rigidez a flexión a lo largo de la longitud, características de la sección resistente del fleje, espesor del fleje... La selección correcta de dichos parámetros posibilita modular la relación entre el par y el ángulo girado. Se plantea el procedimiento general de diseño en función de la curva de par requerida y de las restricciones establecidas, para cualquier tipo de resorte espiral a torsión, así como uno específico para los resortes clotoidales con variación de su rigidez a lo largo de la generatriz del fleje, por posibilitar estos un estudio analítico.

El planteamiento y estudio, requiere de la validación experimental. Se diseñan resortes fabricados en fibra de vidrio con matriz epoxy debido a su alta tensión admisible respecto al módulo elástico y su baja densidad (alta capacidad de almacenamiento de energía). Se realiza tanto el diseño de la instalación como del plan de ensayos y sistemas de adquisición de datos. Los ensayos llevados a cabo indican la alta correlación entre el modelo teórico y el experimental.

El análisis general planteado se complementa con la optimización del resorte, tanto en la sección resistente como de las configuraciones de montaje. Se realiza el estudio de una sección sandwich multi-componente optimizada para la flexión pura y el almacenamiento máximo de energía.

El trabajo propuesto finaliza con la implantación teórica del resorte como almacenamiento de energía dentro de un vehículo ferroviario. Se plantean los diferentes escenarios de funcionamiento del vehículo y del sistema de almacenamiento de energía, las configuraciones básicas del sistema y los flujos de energía en la sección motriz del vehículo. El estudio se complementa con las simulaciones de la integración del acumulador en un vehículo viario en el cual se simulan la descarga del resorte y la aplicación del freno, las simulaciones electromecánicas del conjunto y la simulación del sistema de control diseñado.

Palabras clave: resortes espirales a torsion, materiales compuestos, almacenamiento de energía.

Abstract

Energy supply requires effective and also efficient techniques in production, transport and final use. In last years so many energy storage systems have been developed. Major advances in the field of composite materials; show that it can be possible the energy storage by the elastic deformation of a torsion spiral spring.

An analytical model is generated to study the different variables affecting the length of the spring strip that can be free or blocked either in the housing or in the shaft. Design parameters are strip length, variation of curvature of the spiral, relation between curvature of shaft and housing and variation of bending stiffness along the spring strip length. There is also a particular design case with a clothoid strip and a linear variation in bending stiffness throughout the length of the strip that leads an analytical torque-shaft rotation curve. According to the application of the spiral spring, different torque - angle characteristic curves are required, so a design process has been developed.

Different torsion spiral springs have been constructed and tested to validate the models. They have been manufactured with fiberglass composite and epoxy matrix. Test benches have also been constructed to validate the model. Tests carried out validate the analytical model with considerable accuracy. This work also analyses the optimization of spiral spring weight. Different materials, resistive section shape and serial and parallel configurations are studied to improve it.

There is also a specific work about the electromechanical and electric integration of the torsional spring in a railway system. Simulations about energy flow and energy storage load and down load have been carry out.

Keywords: torsional spiral spring, composite materials, energy storage.

1. Ámbito de la investigación

La investigación realizada se ha llevado a cabo dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Universidad Politécnica de Madrid, más concretamente en la División de Ingeniería de Máquinas. El trabajo está soportado financieramente por varios proyectos, por una parte un proyecto del programa C.E.N.I.T. (Consortios Estratégicos Nacionales de Investigación Técnica) del C.D.T.I. (Centro para el Desarrollo Técnico Industrial) y por otros proyectos P.I.E. (Plan de Innovación Empresarial) de la Comunidad de Madrid.

2. Justificación

Las diferencias entre la energía producida y consumida y la variación de la misma a lo largo del tiempo, hace necesario el diseño de sistemas de almacenamiento de energía como medio de aumentar la eficiencia del sistema energético, tanto macro como microeconómicamente. Los sistemas de almacenamiento permiten reducir las diferencias entre producción y consumo.

La alternativa planteada, es el almacenamiento mediante energía potencial elástica por deformación de un resorte espiral a torsión. Dicha alternativa es conocida y empleada desde hace tiempo, aunque no en almacenamiento industrial de energía. El avance en las últimas décadas de los materiales compuestos, abre las puertas a la utilización de los resortes espirales a torsión como medio de almacenamiento de energía, debido a que este tipo de materiales disponen de valores elevados de tensión máxima admisible y reducida de módulo elástico y densidad. Así, el paso tecnológico planteado va a requerir de nuevas herramientas de desarrollo (análisis y cuantificación de variables de influencia, procedimiento de desarrollo, estudio analítico de la curva característica, desarrollo inverso...) y de análisis de optimización del sistema (cuantificación de variables con influencia inversa sobre especificaciones de diseño, configuración del sistema, sección resistentes...), ya que los órdenes de magnitud de las variables puestas en juego en posibles desarrollos industriales, su no cuantificación y optimización puede implicar que el desarrollo no sea viable.

3. Importancia industrial

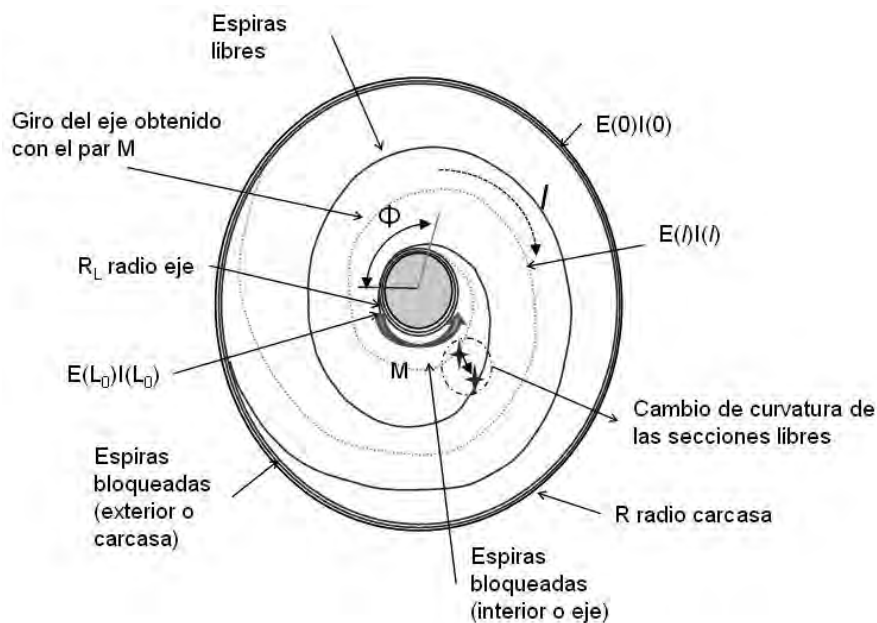
El presente trabajo de investigación analiza la viabilidad técnica de una nueva solución tecnológica en el ámbito del almacenamiento de energía, comparable y competitiva frente a otros sistemas existentes actualmente, así como un procedimiento y modelo de desarrollo del componente básico de los resortes espirales a torsión. La importancia de las investigaciones se establece por una parte al analizar el mercado energético, el cual cuenta con numerosos proyectos científicos y tecnológicos de desarrollo, para cubrir los requerimientos de eficiencia y ahorro energético de la sociedad actual, y por otra el encuadre estratégico de la investigación con las acciones del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación. Tiene relación directa con diferentes acciones estratégicas dentro del “Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011” tanto en lo referente a la energía y cambio climático. La acción estratégica de “Energía y Cambio Climático” se concreta en dos líneas estratégicas donde España es líder: línea 1, energía y mitigación del cambio climático para la producción de energía final limpia y la eficiencia energética, con especial incidencia en el sector transporte y la edificación y línea 2, Movilidad sostenible - transporte. Así mismo, el trabajo de investigación está alineado con el desarrollo e innovación tecnológica sectorial del Plan Nacional, principalmente en los epígrafes relativos a energía, transporte e infraestructuras.

Otro de los objetivos tecnológicos del Plan Nacional, es la aplicación de los sistemas de acumulación en el consumo final energético, y en concreto en el transporte, al ser uno de los sistemas cuya implantación posibilita mayor eficiencia global. Dentro de los objetivos se encuentra buscar un sistema de transporte más integrado, seguro, eficiente, sostenible y respetuoso con el entorno.

4. Modelo generalizado de resortes espirales a torsión

Se desarrolla la base conceptual de los resortes espirales a torsión y se modeliza de forma metodológica, el comportamiento así como la influencia de los parámetros de diseño en la curva característica par – ángulo girado. Se plantea un procedimiento general partiendo de las especificaciones de diseño, curva característica a proporcionar y limitaciones de diseño, radio de árbol, carcasa, longitud y espesor del fleje. Conjuntamente al enfoque estático se plantea el modelo energético de comportamiento para cálculo de la curva característica y deformación de la carcasa.

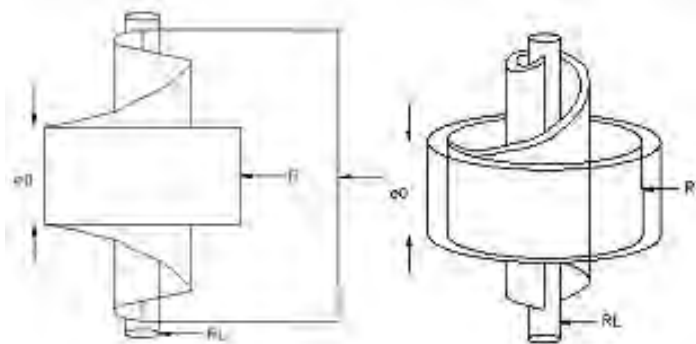
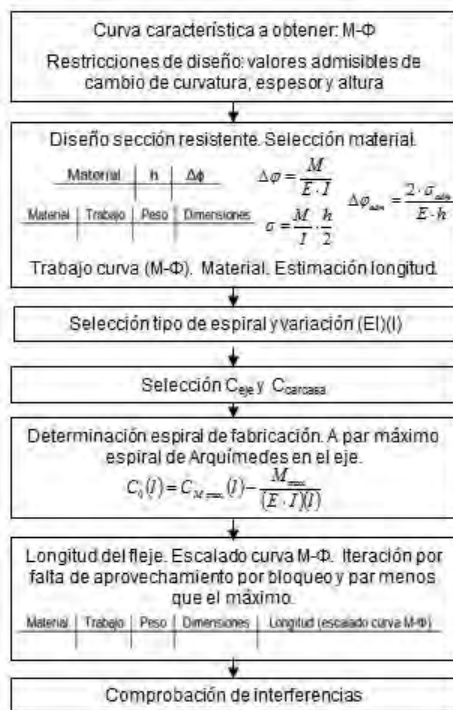
Un resorte espiral a torsión está constituido por un fleje (habitualmente con forma espiral) unido a una carcasa (normalmente como elemento fijo) y a un árbol (como elemento móvil). Según la curvatura de las espiras y la longitud del fleje, estas se pueden encontrar libres, bloqueadas en el árbol (si su curvatura es mayor que la de éste) o bloqueadas en la carcasa (si su curvatura es menor que la de ésta). Al aplicar par las espiras irán eventualmente desbloqueándose de la carcasa y bloqueándose en el árbol.



Se estudian los esfuerzos principales que existen en el fleje (flexión, cortadura y tracción- compresión de las espiras) y los posibles condicionantes que permitan la simplificación del problema (despreciar efectos de cortadura y tracción – compresión, con lo que se puede suponer flexión pura), ante el requerimiento de obtener un comportamiento de par - ángulo girado especificado.

Para el análisis de la curva característica (par - ángulo girado) del resorte se debe tener en cuenta que el ángulo girado por el resorte, para un par dado $\Phi(M)$, es obtenible mediante las contribuciones al giro de las espiras libres $\Phi_l(M)$ y las bloqueadas en el árbol $\theta(M)$ y en la carcasa $\beta(M)$. El trabajo presentado establece la forma de calcular dichos valores en función tanto del par aplicado como de la posición longitudinal del fleje.

Definidos los parámetros anteriores es posible realizar la construcción de las curvas características del fleje a diferentes pares. Una vez definida la longitud del resorte y construida la curva característica, puede darse el caso que en ciertas posiciones a lo largo de la longitud no se ajuste la curva obtenida con la especificada. Si esto ocurre se deberá modificar localmente los valores de la rigidez a flexión para lograr dicho ajuste. A continuación se plantea el flujograma del procedimiento de diseño de los resortes.



Un caso particular de resortes espirales a torsión son los que tienen curva generatriz clotoidal y variación de rigidez a flexión a lo largo de la longitud del fleje. De manera general es posible definir una curvatura generalizada o aproximación mediante ecuación linealizada de la curva para cualquier resorte. Con ello se puede proceder a realizar un estudio analítico similar al que se desarrolla a continuación, teniéndose en cuenta el error cometido en la aproximación de la espiral definida respecto a la expresión polinómica.

La curva clotoidal tiene la característica peculiar que su deformada vuelve a ser otra clotoide. Los parámetros de esta segunda clotoide pueden ser obtenidos de manera sencilla, en función de los parámetros de diseño.

Al permanecer invariable la longitud total del resorte con el par aplicado (ya que las cargas de tracción – compresión y cortadura se consideran despreciables frente a las de flexión, según ha sido analizado con anterioridad) la zona de espiras no bloqueadas se extenderá desde la longitud bloqueada en la carcasa hasta la longitud equivalente a la total menos la bloqueada en el árbol.

La unión de estas dos características permite definir una curva analítica de comportamiento del resorte en función del par aplicado. Esto se logra con una metodología análoga a la del caso general, siendo ambas metodologías coherentes en los puntos de convergencia.

5. Materiales empleados. Optimización del fleje

Una vez analizadas las características técnicas y el procedimiento de diseño de resortes espirales a torsión, se plantean los materiales con los que fabricar el fleje y las posibles optimizaciones de su peso, dimensiones y energía almacenada entre otras. La optimización se puede llevar a cabo a través del material, de la sección resistente (tanto su forma geométrica como los diferentes materiales que la pueden constituir logrando que cada una de las secciones trabaje a su tensión máxima) o de las posibles configuraciones de montaje (en serie o en paralelo manteniéndose el mismo ángulo girado o el mismo par).

La energía adquirida por un volumen cualquiera cuando se somete a sollicitaciones de flexión pura, es directamente proporcional al cuadrado de la tensión axial alcanzada e inversamente proporcional a la rigidez del material que compone la sección. Además, depende de la geometría concreta del cuerpo sometido a flexión. Sin embargo, el parámetro que interesa optimizar no es tanto la cantidad de energía absorbida, si no la capacidad de almacenamiento por unidad de peso, es decir la densidad de energía, lo que implica que también se optimizará el coste económico.

En cuanto al material empleado interesa utilizar un material con una elevada resistencia mecánica en dirección axial, y rigidez y densidad lo más reducidas posible. El reto es, entonces, encontrar un material que alcance el mejor compromiso entre estas tres variables. Este proceso de selección del material adecuado no es, como pudiera parecer a simple vista, nada trivial, debido a la gran cantidad de factores que se ponen en juego. Por consiguiente, en este trabajo se dedica un apartado específico a este aspecto.

De la geometría de la sección resistente dependerá principalmente que se pueda alcanzar una tensión cercana o igual a la admisible. Las sollicitaciones de flexión pura provocan una distribución lineal de deformaciones axiales esto hace que las fibras más alejadas de la fibra neutra, tanto a tracción como a compresión, trabajen al completo de su capacidad.

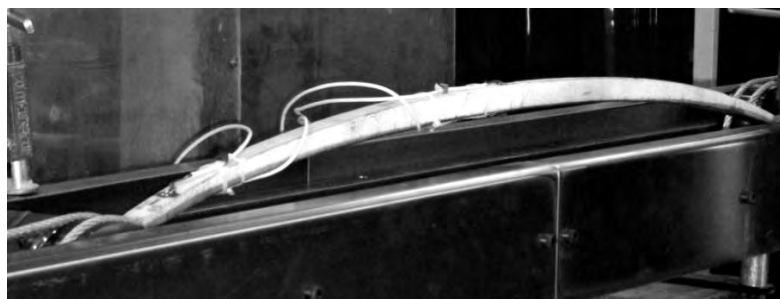
Como punto de partida del proceso de optimización de la sección resistente, se toma una geometría sencilla, concretamente una sección rectangular maciza con el que se fabricó el resorte del primer prototipo del acumulador de energía. De ahí se logra desarrollar una sección sándwich multicomponente optimizada y se plantea la alternativa novedosa de una sección extruida.

Respecto a la sección sándwich, que es la alternativa tecnológica más factible con el estado de la técnica actual, se ha desarrollado un procedimiento de diseño para poder dimensionar vigas con sección sándwich sometidas a flexión pura. Para ello, se va a suponer el caso más general posible, con una viga compuesta por tres materiales diferentes; uno para la piel de tracción, otro más rígido para la de compresión y un tercero para el núcleo. Para la optimización del diseño se utiliza el cambio de curvatura como un parámetro de entrada. A partir del cambio de curvatura de cada sección, se pueden calcular también las distancias entre la fibra neutra y la piel más cargada, tanto a tracción como a compresión, para que trabajen a la tensión máximas de diseño.

Conjuntamente con la optimización de la densidad de energía se estudian posibles problemas derivados de dicha optimización, como son los estudios relativos al posible fallo de la piel de compresión debido a efectos de pandeo global así como local y otros posibles modos de fallo de la sección sándwich.

Antes de llevar a cabo los ensayos correspondientes al modelo desarrollado, se decidió realizar una serie de simulaciones por elementos finitos, aunque estas simulaciones no sustituyen a los ensayos propiamente dichos, ya que por ejemplo el pandeo local de la piel de compresión o los concentradores de tensiones no son simulados con el modelo desarrollado. Una vez analizadas las simulaciones se debe realizar una correcta sensorización. En este caso, como el objetivo de los ensayos es comprobar el comportamiento de la zona central de las probetas para verificar la aparición de los esfuerzos provocados por las sollicitaciones de flexión pura, se utilizan galgas orientadas longitudinalmente y situadas en la mitad de la longitud de la probeta, una en la piel de tracción y otra en la de compresión.

Una vez colocadas las galgas, se procede a anclar la muestra a las poleas sollicitadoras del banco de ensayos. Ha sido desarrollado un banco de ensayos especial ya que los bancos de flexión a tres y cuatro puntos generarían esfuerzos de despegado de las pieles. El par se debe ir aplicando a través del volante situado al final del husillo. La curvatura de la probeta irá aumentando gradualmente hasta que se produzca la rotura de la misma.



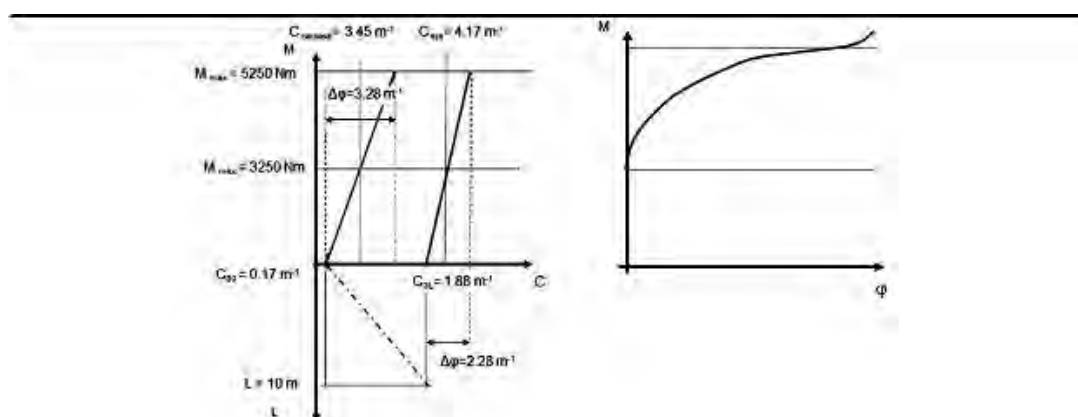
Una vez se ha llevado a cabo, el diseño, fabricación, y validación del mecanismo de ensayos a flexión pura, se puede pasar, al ensayo de las muestras propiamente dichas. Durante el desarrollo de este trabajo se realizaron ensayos de flexión pura sobre probetas con sección sándwich. El diseño de la sección monolítica optimizada se ha presentado como una posibilidad que podría ser una alternativa al sándwich en determinadas circunstancias. Sin embargo su completo desarrollo necesitaría de un estudio mucho más profundo que escapa a los objetivos de este trabajo.

6. Diseño, fabricación y validación experimental de un resorte monolítico para curva característica de baja viabilidad

La curva generatriz del fleje del resorte de baja variabilidad del par debe tener inicialmente longitud bloqueada en la carcasa cuyo desbloqueo y bloqueo en el árbol conllevará la baja variabilidad. Para ello se va a utilizar una curva generatriz clotoidal, curvatura dependiente linealmente con la longitud, y variación del módulo a flexión inversamente proporcional a la longitud, siendo más resistente en la unión con el árbol que con la carcasa.

Mediante el modelo desarrollado se ha comprobado la deformada del resorte a par nominal así como su rango de variabilidad. Se ha comprobado que la deformada obtenida es análoga mediante el cálculo teórico, asumiendo un error de convergencia del 5% tanto en la fuerza como en el desplazamiento y de un error del 0,5% en el par. El modelo también permite realizar el cálculo del posicionamiento de las diferentes espiras del resorte en los distintos estados de carga.

En las simulaciones planteadas se comprueba la constancia de esfuerzos flectores y esfuerzos cortantes despreciables, observándose la validez de hipótesis de constancia del par a lo largo de toda la longitud del fleje. La tensión alcanzada en el resorte diseñado respecto a la máxima admisible especificada proporciona, a par nominal, un coeficiente de seguridad en el diseño de 1,25.



Para la fabricación del resorte, se van a emplear nueve capas de fibra de vidrio HP unidireccional, las cuales se extiende con la geometría adecuada (al tener forma espiral, la curvatura va a implicar que cada una de las capas del fleje tengan diferentes medidas), sobre una superficie plana, y se procederá a impregnarla con resina epoxy. Tras la adición de la resina las capas se recubren con plástico protector y son curadas a temperatura ambiente durante doce horas aproximadamente para lograr la gelificación de la resina. Pasado dicho tiempo, se procede a dar forma el resorte, para ello, se colocan las capas alrededor del árbol, para continuar posicionando las diferentes capas en el molde metálico diseñado con la geometría de fabricación del resorte. Cuando todas las capas están situadas en el molde, se instalará el contra molde, de tal manera que entre ambas piezas se ejerza presión necesaria para un curado correcto de las capas de material compuesto. Para garantizar el correcto desmolde del resorte, se aplica desmoldeante tanto en el molde como en el contra molde. Una vez el resorte se ha introducido entre el molde y el contra molde, se debe proceder al curado del mismo. Para ello se introduce toda la estructura en un horno a el proceso de curado propiamente dicho.



La función global del banco de ensayos consiste en caracterizar el comportamiento del resorte tanto en el proceso de carga como en la descarga. El primer gran conjunto de ensayos a los que se va a someter al prototipo son los de recepción de los componentes, tanto fabricados (árbol, bastidor, trinquete...) como comerciales (motor, reductora...), donde se comprobará que han sido fabricados según especificaciones y que sus características técnicas son las requeridas. Una vez analizados los elementos por separado se realizan los ensayos de funcionamiento en conjunto y control previo de integración de sistemas, ensayo de cadena cinemática y ensayo de seguridad electromecánica.

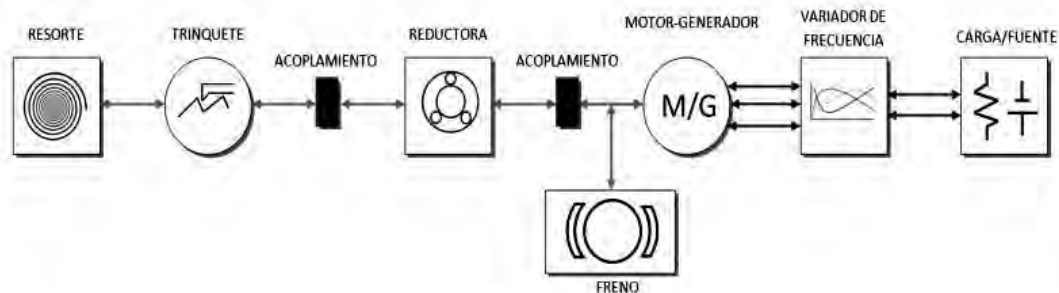
Todos los ensayos anteriores, han dando un resultado satisfactorio, por lo que se continúan con el resto de los ensayos. Conjuntamente con dichos ensayos se ha analizado las diferencias entre el diseño especificado y las características del prototipo desarrollado, por ejemplo módulo de elasticidad, espesor de la viga, rigidez a flexión o radio del árbol. Se plantean de forma resumida los siguientes: Ensayo de comportamiento, carga y descarga del resorte. Ensayo de análisis de tensiones. Análisis de repetibilidad de resultados y plausibilidad modelo - ensayo.

Los ensayos analizados sobre el prototipo permiten plantear que tanto el modelo general de resortes espirales a torsión como el modelo particular para resortes con curva generatriz clotoidal con variación de la rigidez a flexión con la longitud, desarrollados, permiten el análisis y la modulación de la curva característica par - ángulo girado según especificación. El punto de error máximo en la curva característica es de un 12%, siendo el error medio ponderado a lo largo de toda la curva un valor muy inferior a éste, con error de repetibilidad tras cinco ensayos del 6%. El análisis energético realizado conjuntamente con la curva par - ángulo girado proporciona un error en el flujo energético de carga - descarga y transmisión en la cadena cinemática del 3,9%.

7. Integración del acumulador de energía dentro de un vehículo viario

El objetivo final de este desarrollo es la aplicación del acumulador de energía mediante el empleo de resortes a un vehículo viario de transporte público de viajeros. Para recargar el acumulador se instalarán conexiones eléctricas en cada parada. La energía transferida al acumulador debería ser suficiente para que el vehículo recorra la distancia entre dos paradas consecutivas.

Para una correcta integración del acumulador del vehículo y asentar una base correcta sobre la que diseñar se analizan los distintos casos de funcionamiento del conjunto (parada, arranque en vacío, arranque en carga, funcionamiento en carga, retención en carga, frenado y funcionamiento en marcha atrás). No solo es importante analizar cómo debe comportar el acumulador en función de las necesidades de potencia del vehículo, sino que es vital analizar el paso de un escenario al siguiente, es decir, los transitorios de funcionamiento. Así mismo se analizan las dos configuraciones la mecánica y la electromecánica (con dos alternativas de diseño la carga descarga a través del eje y de la carcasa).



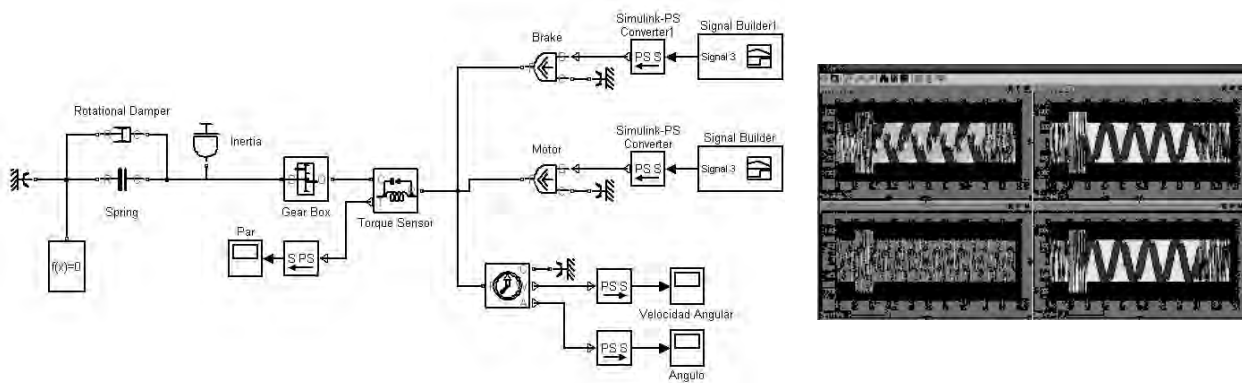
Otro análisis importante es el del trabajo del grupo motor-generador cuando se demande potencia del sistema o cuando se inyecte energía para ser almacenada. Es análogo analizar el comportamiento como motor y como generador ya que las curvas de par velocidad y potencia velocidad se desvían menos de un 5%. Dado que se operaría en la zona de par constante del resorte se debe, mediante la electrónica de potencia, trabajar siempre igualando el par con el fin de mantener un régimen de giro con el que obtener la potencia necesaria en cada momento. Se establecen estudios pormenorizados de la operación a máximo régimen y a mínima velocidad.

Una vez analizadas las configuraciones y sus principales características se estudian y establecen los flujos de energía entre los diferentes componentes del acumulador. El almacenador maneja la energía en dos sentidos. Cuando el acumulador se carga, la energía, obtenida de una toma de corriente o mediante regeneración, fluye a través del variador que comunica la energía eléctrica al motor. A través del árbol de transmisión se comprime el resorte. Durante la carga se conecta el trinquete con el fin de evitar descargas accidentales. Cuando se descarga el resorte se debe primero desconectar el trinquete para permitir así el giro en dirección opuesta a la de carga. Tras esta operación se desconecta el freno y da como consigna de velocidad al resorte un valor negativo. Cuando la energía se extrae del acumulador de energía mediante deformación elástica ésta sigue el camino opuesto al descrito anteriormente.

Dado que el fin del acumulador es intercambiar energía con el conjunto de sistemas del vehículo se ha optado por conectar el almacenador al bus de corriente continua. Al conectar el acumulador al bus de corriente continua se simplifica el montaje al tratarse de una conducción que recorre en vehículo en toda su longitud y que dispone de tomas en numerosos puntos. Se evita de este modo instalar nuevos conductores con lo que se facilita el diseño final.

8. Simulaciones de la integración del acumulador en un vehículo viario

Con el fin de llevar a cabo un diseño del sistema de control del acumulador aplicado al vehículo se han llevado a cabo modelizaciones del sistema de control y del sistema de almacenamiento. Los modelos empleados combinan la modelización de elementos mecánicos con elementos de regulación de manera que puede analizarse de forma más intuitiva el efecto que parámetros mecánicos tienen sobre el control del acumulador. Las simulaciones se han realizado empleando Simulink por tratarse de un programa de gran potencia y de uso intuitivo. Para la modelización de la parte mecánica se ha empleado el paquete Simscape que incluye diversos elementos preconfigurados que han facilitado el desarrollo de modelos. Para la parte eléctrica se ha empleado la librería SimPowerSystems. Por ejemplo se plantea el esquema básico del proceso de carga.



9. Conclusiones

Los trabajos realizados son de ámbito multidisciplinar y permiten disponer de un desarrollo base para la integración de un sistema de acumulación basado en resortes espirales a torsión en la industria ferroviario. Por todo ello se considera que se aporta un estudio riguroso y estructurado de alto nivel tecnológico basado en proyectos de I+D+i. Con base a estas propiedades del trabajo desarrollado se ha optado por su envío e inscripción a la III convocatoria del citado premio.

Optimización de la Política de Reperfilado de Ruedas para el Citadis 302, en la explotación de Metro Ligero Oeste

Optimization of the wheel truing approach for the Alstom Citadis 302, in the West Light Rail network

M^a Victoria Alba Díaz*

Master Universitario en Sistemas Ferroviarios
Universidad Pontificia de Comillas

Resumen

El objetivo de este artículo es el desarrollo de una Política de reperfilado de ruedas optimizada para la flota de vehículos Alstom que opera en la red de Metro Ligero Oeste.

Esta nueva política de mantenimiento de rodadura se ha diseñado para aumentar la vida útil de las ruedas y para asegurar el cumplimiento de los requisitos de seguridad establecidos por el fabricante. Incluye una medida intermedia de los parámetros de rodadura con un dispositivo láser para evaluar el estado y así realizar un mantenimiento predictivo en lugar de preventivo. Además redefine los parámetros críticos de rodadura y las periodicidades de las tareas de mantenimiento asociadas.

Palabras clave: Ruedas ferroviarias, mantenimiento de rodadura, reperfilado, Citadis.

Abstract

The aim of this paper is to provide the development of an optimized wheel truing approach for the fleet of Alstom tramways in the West Light Rail network.

This new policy of tread maintenance has been designed to increase the wheels lifecycle and to assure the fulfillment of the safety requirements established by the manufacturer. It includes an intermediate measure of the wheel parameters with a laser device to evaluate the state and therefore, carry out a predictive maintenance instead of preventively. In addition this approach redefines the wheel critical parameters and the periodicities of the associate tasks of maintenance.

Keywords: Railway wheels, tread maintenance, truing, Citadis.

Abreviaturas

Sh	Altura de Pestaña
Sd	Espesor de Pestaña
qR	Ángulo de la cara activa de la pestaña
B.M.	Bogie Motor
B.P.	Bogie Portante

* mv.alba.diaz@gmail.com

1. Introducción y objetivos

El modo de desplazamiento que se utiliza en la mayoría de los casos en el ferrocarril, es el de rueda de acero sobre carril igualmente de acero; a excepción de reducidos ejemplos en los que se usan neumáticos (Fig.1) o fenómenos de electromagnetismo (Fig.2).



Figura 1. Metro de París



Figura 2. Tren Maglev de Shanghai

La misión de las ruedas del tren es la de sustentar, guiar, transmitir esfuerzos al carril y lograr circular en curvas y frenar. Cada una de estas funciones induce esfuerzos mecánicos y térmicos en las ruedas. Así, con el paso del tiempo, éstas se van desgastando, modificándose su geometría inicial.

Este **desgaste** tiene dos tipos de **consecuencias: económicas y de seguridad**. Para regenerar el perfil original de la rueda es necesario tornearla, lo que se traduce en pérdida de material.

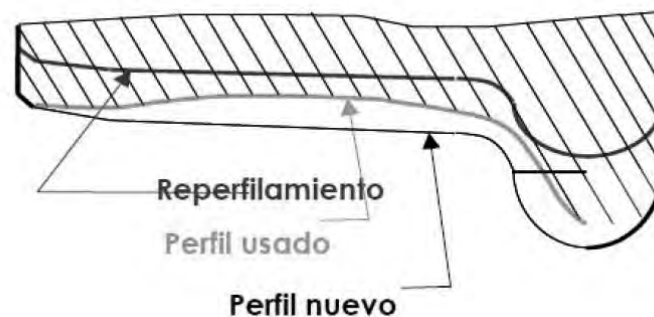


Figura 3. Superposición de perfiles: nuevo, usado y reperfilado (tras el torneado)
Fuente: Manuel descriptif : Mécanique et dimensionnement de TRANSAMO. [4]

Además, el desgaste de la banda de rodadura produce un aumento de la conicidad de la rueda y por tanto una disminución en la velocidad crítica; lo que puede atentar contra la seguridad y el confort dinámicos.

El control del perfil de rueda (control de los parámetros de rodadura: apartado 2.1 del presente artículo) es **una necesidad imprescindible para cualquier actividad de mantenimiento ferroviario**, ya que se trata de uno de los elementos principales de seguridad del tren y uno de los mayores gastos a abordar durante su vida.

El ferrocarril exige, pues, un gran esfuerzo en mantenimiento. La vida útil aproximada del material rodante ferroviario ronda los treinta años. El mantenimiento es un sector de futuro que ha estado olvidado durante muchos años, pero que, cada vez más, se convierte en una estrategia de competitividad de las Empresas.

Es fundamental **optimizar la Política de Reperfilado de Ruedas**: adaptándola al régimen de explotación y al comportamiento de las unidades en el trazado existente. De esta manera se consigue **alargar la vida de las ruedas**, lo que redundará en una **disminución de costes de mantenimiento** del Material Móvil. Además el conocimiento y mayor control del comportamiento de la rodadura incluidos en el nuevo enfoque de mantenimiento, garantiza una **mejora importante de la seguridad** del medio de transporte.

2. Captación y análisis de los parámetros de rodadura

Metro LigerOeste emplea tranvías del fabricante Alstom, modelo Citadis 302. Con el objetivo de encontrar la Política de Reperfilado más adecuada, se han determinado y analizado las condiciones de funcionamiento del sistema de rodadura del Citadis en la explotación actual del operador Metro LigerOeste.

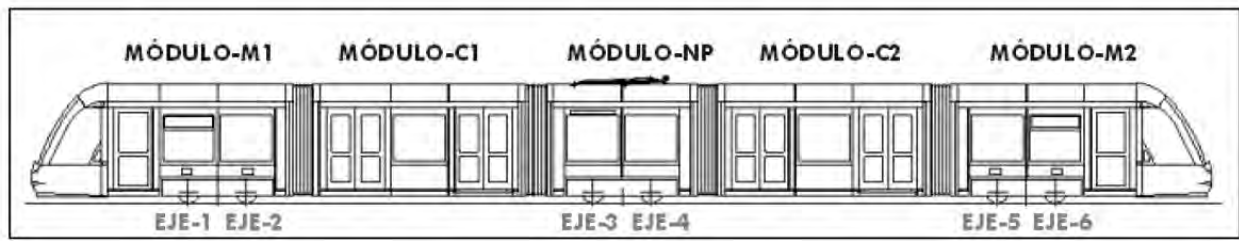


Figura 4. Esquema de un CITADIS 302. Fuente: <http://www.alstom.com/transport/> [10]

El Citadis 302 consta de cinco coches y tres bogies: dos motores (en módulos M1 y M2) y uno portante (en módulo NP). Son 100% piso bajo para garantizar la accesibilidad total al vehículo. Esto condiciona la ubicación en techo de la práctica totalidad de sus equipos.

Las ruedas no están caladas en los ejes como ocurre tradicionalmente; se unen mediante un eje no concéntrico que evita la ocupación del pasillo entre asientos. Por otro lado, la articulación del bogie y la suspensión secundaria se efectúa encima de cada rueda y no en un pivote central como en los bogies convencionales. Lleva incorporada una suspensión helicoidal que minimiza las vibraciones entre la rodadura y la caja del vehículo. A esta suspensión secundaria se le suma la primaria, consistente en un recubrimiento elástico de la llanta de rodadura.

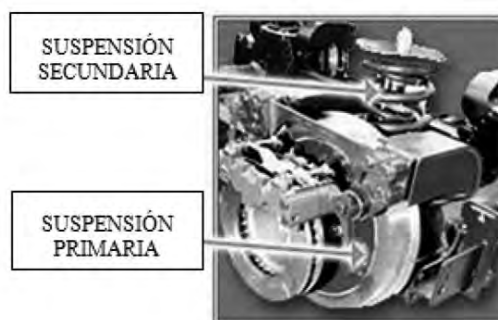


Figura 5. Suspensión secundaria y primaria en el Citadis 302. <http://www.alstom.com/transport/> [10]

Este cambio es el que posibilita el 100% piso bajo pero a la vez reduce la suavidad del tranvía a su paso por curvas cerradas y **una mayor concentración de esfuerzos en la interfaz rueda-carril**.

2.1. Parámetros de Rodadura

- **Círculo de rodadura:** sobre la superficie de rodadura a $L2=60\text{mm}$ de la cara interna.
- **Espesor de pestaña (Sd):** la medida entre la cara interna de la rueda y el punto de la cara activa ubicado a $L3=10\text{mm}$ del círculo de rodadura.
- **Altura de pestaña (Sh):** distancia entre el vértice de la pestaña y su proyección sobre la horizontal que pasa por el círculo de rodadura.
- **Ángulo de la cara activa de la pestaña (qR):** distancia horizontal existente entre un punto ubicado sobre la cara activa de la pestaña a $L1=2\text{mm}$ de su vértice y la proyección del punto donde se mide el espesor de pestaña.

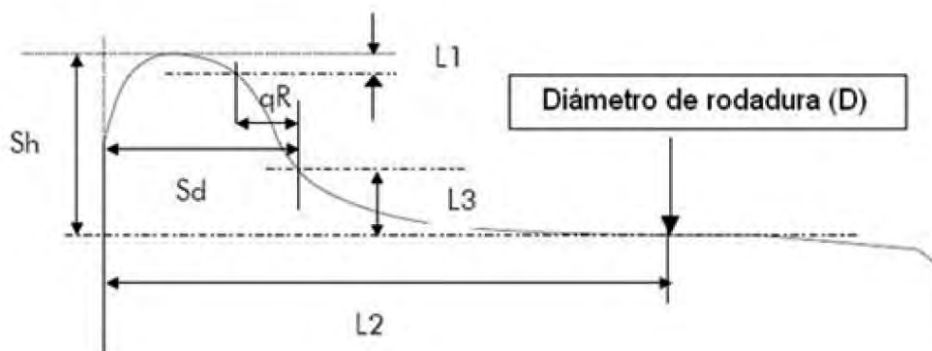


Figura 6. Parámetros de Rodadura

Fuente: SE-01-ES-IT.302.T2.01 Instrucción Técnica Reperfilado de ALSTOM [1]

Los **parámetros nominales de la rueda con perfil B05** utilizada en Metro Liger Oeste son los siguientes:

- o Diámetro de rueda nueva (**D**): **590mm**
- o Círculo teórico de rodadura: a 60mm de la cara interna de la rueda ($L2$)
- o Anchura total del bandaje: 110mm
- o Altura de la pestaña (**Sh**): **25,5mm**
- o Espesor de pestaña (**Sd**): **22,94mm**
- o **qR**: **5,72mm**

2.2. Ciclo de Vida de una rueda B05

Toda rueda ferroviaria ve alterada su geometría y, por tanto, sus parámetros de rodadura, debido al **desgaste que sufre en vía** (por el contacto rueda-carril en circulación), y debido a la **pérdida de material** que tiene lugar **en el torno** (ya que es necesario mecanizarla para regenerar su perfil y restaurar los parámetros de rodadura para cumplir con los límites de seguridad establecidos por el fabricante):

- o Diámetro de rueda (D) > **530mm** ($D=530\text{mm}$: fin de la vida de la rueda)
- o Espesor de pestaña (S_d) > **18mm**
- o Altura de pestaña (S_h) < **27,5mm**
- o qR > **3,5mm**

El ciclo de vida de la rueda B05 se puede representar en la siguiente imagen (Figura 7).

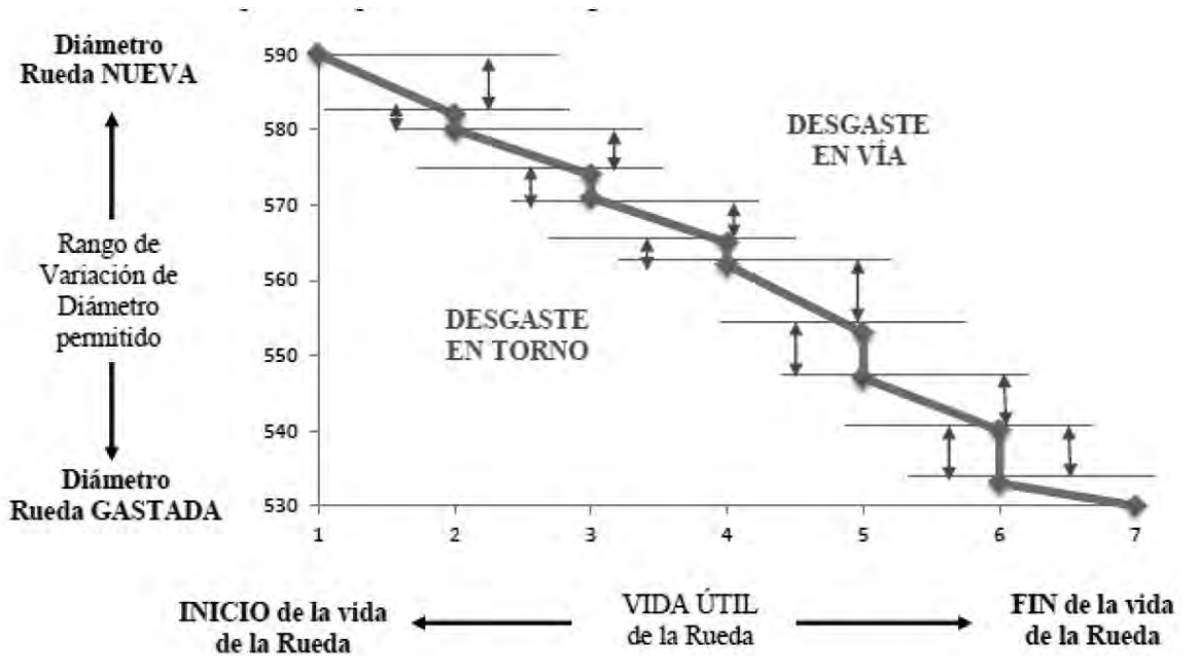


Figura 7. Ciclo de vida de la rueda B05. Fuente: Elaboración propia

2.3. Requisitos previos de la nueva Política de Reperfilado

Si el primer objetivo de adaptar la política de reperfilado es **alargar la vida de las ruedas (reducción de costes)** habrá que 1) minimizar el desgaste en vía o 2) reducir el desgaste en torno. Minimizar el desgaste en vía supone actuar sobre la interfase rueda-carril -tarea fuera del alcance de este proyecto- por tanto, la única posibilidad es intentar **reducir el desgaste de la rueda en el torno**. (Primer requisito de la Nueva Política).

Dado que el segundo objetivo de la nueva Política es una **mejora de la seguridad**: habrá que **controlar** con mayor frecuencia **los valores de los parámetros de rodadura** para corregir aquellos que incumplan los límites establecidos por el fabricante. (Segundo requisito de la Nueva Política).

El propio torno, antes y después del mecanizado realiza medidas sobre las ruedas. Este hecho limita el control de los parámetros de rodadura a las visitas programadas de manera preventiva cada 24.000km, encontrándose el operario unidades que han circulado superando ligeramente los límites de seguridad. Para solventar este problema y poder acometer el **mayor control** de los parámetros requerido, se adquiere un **perfilómetro láser portátil** capaz de medir dichos parámetros en un tiempo muy razonable.

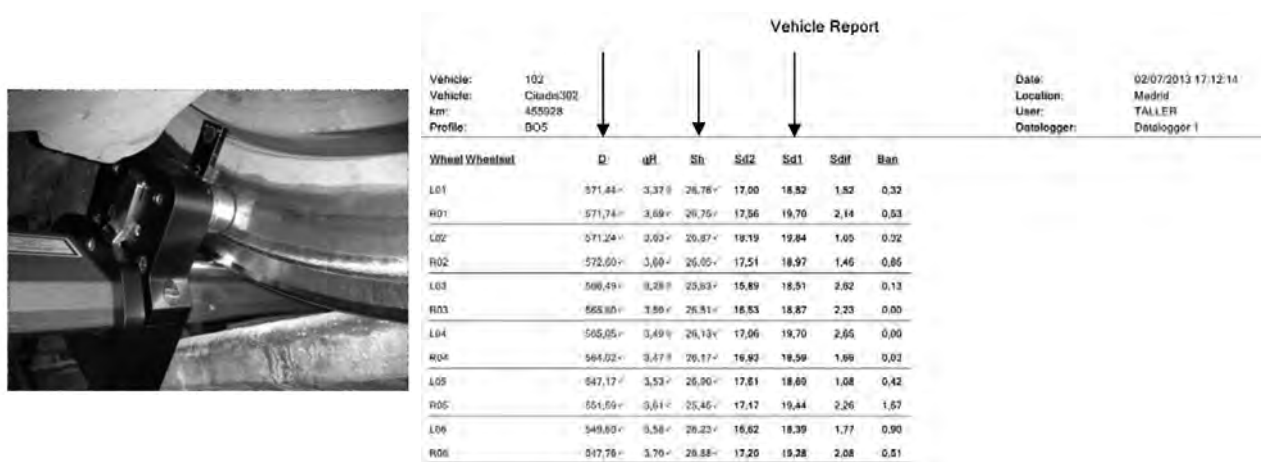


Figura 8. Perfilómetro midiendo parámetros de rodadura e informe de medidas Fuente: Elaboración propia

3. Establecimiento de una nueva Política de Reperfilado

Definidos los requisitos previos de la nueva Política, se procede a analizar en profundidad el **comportamiento del perfil de rodadura**. Para ello se intercalan, entre torneado y torneado de cada tranvía -24.000km-, dos medidas con perfilómetro (P1 a los 16.000km y P2 a los 22.000km). Estas medidas adicionales permiten conocer cómo evolucionan los diferentes parámetros de rueda y establecer el momento aproximado en que se empiezan a superar los límites fijados por el fabricante.

La tabla 1 muestra el resumen de los resultados de la campaña de medidas con perfilómetro aplicada a la flota de 27 unidades Citadis durante el 2011-2012.

	P1	P2	T
% medidas Sh > 27.5mm	0%	20%	65%
% medidas Sd < 18 mm	1%	3%	14%

Tabla 1. Resumen de resultados campaña de medidas con perfilómetro. Fuente: elaboración propia

Se puede observar que a los 16.000km del anterior torneado (medida P1) no hay alturas de pestaña medidas que superen los 27.5mm límite fijados por Alstom, y únicamente un 1% de todas las ruedas medidas tenía un espesor de pestaña inferior a los 18mm límite. Se observa cómo a medida que aumenta el kilometraje (medida P2 realizada a los 22.000km y medida en el torno a los 24.000km) el porcentaje de medidas que incumple los límites también aumenta.

CONCLUSIÓN: el kilometraje entre torneados ha de reducirse.

- por motivos de seguridad.
- por motivos económicos. La experiencia y las campañas realizadas en Metro Ligero Oeste han demostrado que cuanto menos superen los parámetros de rodadura (medidos a la entrada del torno) los límites establecidos, menor cantidad de material habrá que mecanizar para restaurar el perfil, por tanto: mayor potencial de vida de las ruedas y ahorro.

Las tendencias en el Mantenimiento Ferroviario marcan un claro reemplazo del mantenimiento preventivo fijo por el mantenimiento predictivo y la monitorización. Ya se ha deducido que conviene reducir el kilometraje entre torneados, pero ¿cómo dar un paso más y saber cuál es el momento óptimo para intervenir? Con la ayuda nuevamente del Perfilómetro láser.



Figura 9. Flujograma Nueva Política de Reperfilado. Fuente: Elaboración propia

- El nuevo valor de kilometraje entre torneados se fija a 20.000km (en lugar de los 24.000km previos).
- Se intercala una medida de control con perfilómetro a los 16.000km.
- Si de esta medida se deduce que todos los parámetros de rodadura están en tolerancias y pueden continuar sin superar los límites fijados por el fabricante 4.000km más en circulación se mantiene su torneado preventivo a los 20.000km.
- Si al monitorizar el estado se encuentran parámetros fuera de cotas o próximos a los límites, se adelanta el torneado.

4. Comparación de las diferentes Políticas de Reperfilado

A continuación se compararan los resultados obtenidos con la aplicación de las diferentes Políticas de Reperfilado de Ruedas. La nueva Política (optimizada) empezó a aplicarse a principios de 2013 y de ahí se han extraído los datos que se muestran.

Esta comparación se hace, en primer lugar (*apartado 4.1*), según criterios de seguridad y en segundo lugar, según criterios económicos (*apartado 4.2*).

4.1. Según criterios económicos (vida de las ruedas, horas/hombre, etc.)

Se representan en los gráficos anexos los valores de altura y espesor de pestaña a la entrada del torno (en mm). Según los límites se considera que cumplen con la seguridad aquellas alturas que estén por debajo de 27,5mm y aquellos espesores que sean superiores a 18mm. En el eje de abscisas se representan los torneados. Cada torneado es una línea vertical compuesta por 12 puntos (12 medidas de sus ruedas). También se representa la recta de tendencia de las medidas en color naranja

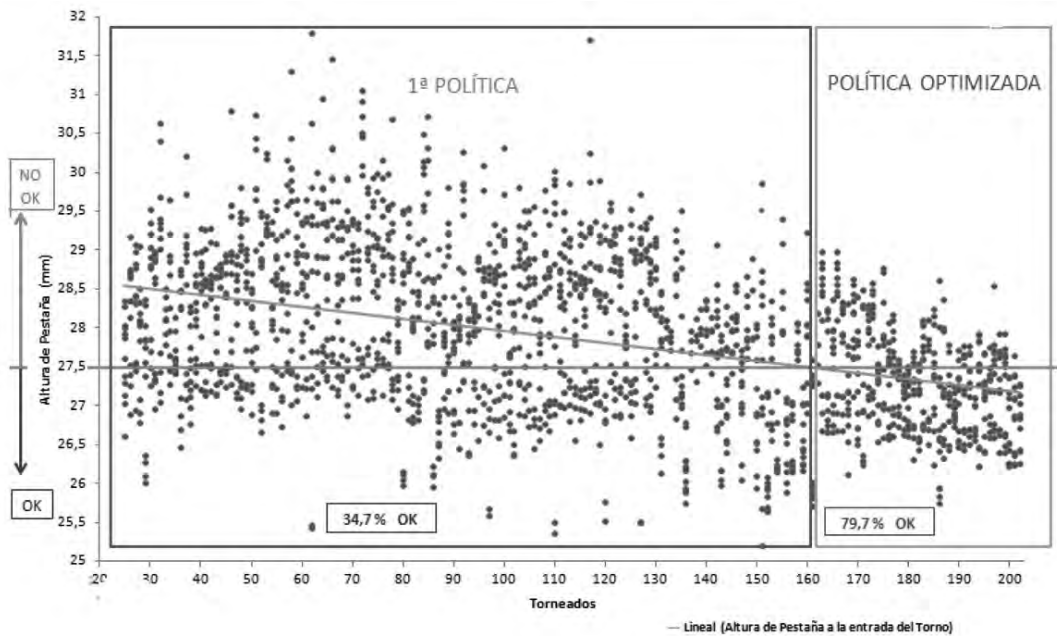


Figura 10. Alturas de Pestaña a la entrada del torno. Fuente: Elaboración propia

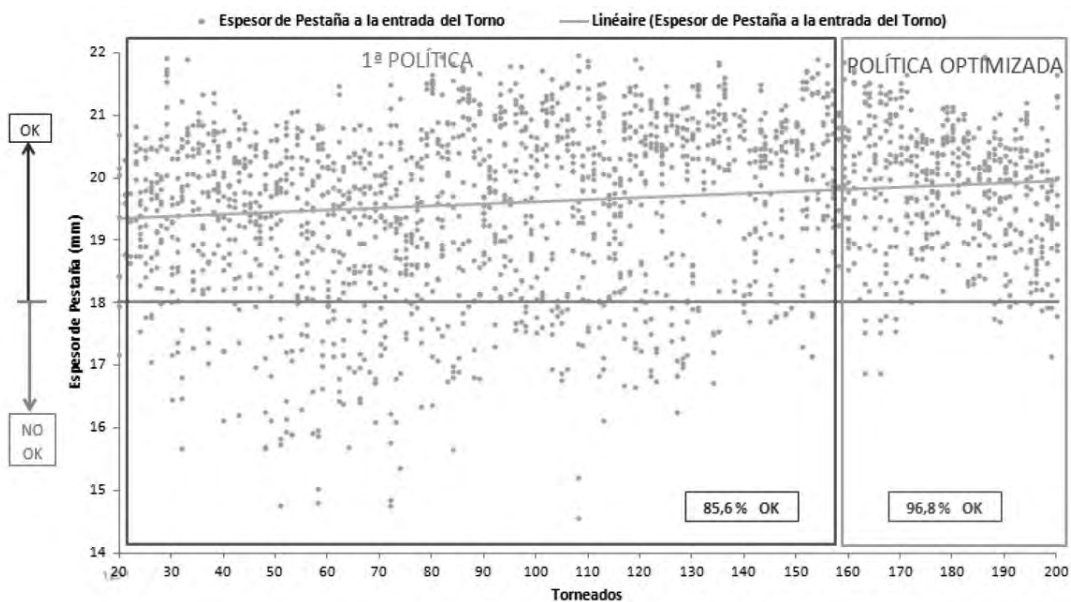


Figura 11. Espesores de Pestaña a la entrada del torno. Fuente: Elaboración propia

- El porcentaje de parámetros que cumple con los límites establecidos por el fabricante aumenta en la Política optimizada.
- A medida que la política optimizada está implantada en la flota, se garantizará el objetivo de seguridad de que todo tren en circulación cumple con los límites de seguridad (100% medidas de altura y espesor de pestaña).

4.2. Según criterios económicos (vida de las ruedas, horas/hombre, etc.)

	1ª Política	Política Optimizada
Kilometraje entre Torneados	24.000 km	20.000 km (además de una medida con perfilómetro a los 16.000km)
Nº torneados/año (suponiendo 60.000km/vehículo*año)	68	81
Horas hombre/torneado	32-40 2 turnos-2'5 turnos 2 personas	16-24 1 turno-1'5 turnos 2 personas
Horas hombre/año	2176 - 2720	1296 – 1944
Tasa de desgaste B.M. en vía (mm φ /10.000km)	2,44	2,08
Tasa de desgaste B.P. en vía (mm φ /10.000km)	1,26	1,37
Tasa de desgaste B.M. en torno (mm/ φ 10.000km)	4,3	1,48
Tasa de desgaste B.P. en torno (mm/ φ 10.000km)	1,41	1,29
VIDA ÚTIL B.M. (km) (4,6 mm φ/ 10.000km)	130.000	210.000 (2,82 mm φ/ 10.000km)
VIDA ÚTIL B.P. (km) (2 mm φ/ 10.000km)	300.000	300.000 (2 mm φ/ 10.000km)

Figura 12. Comparación de las Políticas de Reperfilado. Fuente: Elaboración propia

- **Las ruedas de Bogies Motores** (8 ruedas de las 12 de un tranvía en Metro LigerOeste) pasan de durar apenas 130.000km a 210.000km (**161% más de vida útil**).
- **Las ruedas del bogie portante**, que sufren menos desgaste, **mantienen su vida útil** de unos 300.000km aproximadamente.
- A pesar de haber más torneados al año, dado que éstos son menos tediosos, la política optimizada supone un **ahorro aproximado de 830 horas de mano de obra al año**.

5. Conclusiones

- El control del perfil de rueda y el control de la medida de sus parámetros es una necesidad imprescindible para cualquier actividad de mantenimiento ferroviario.
- No existe una Política de Reperfilado Universal, sino que hay que adaptarla a la situación concreta de cada explotación, habiendo previamente estudiado la interacción Material- Infraestructura. En nuestro caso:
 - o Las ruedas están circulando en contacto con la cara interna de la pestaña más que con la externa en una parte importante de la vía con curvas. Esto produce un desgaste excesivo de la pestaña y chirridos al paso por ciertos tramos.

- o No parece que exista una correspondencia adecuada entre el perfil de la rueda y el del carril, efecto que se maximiza debido a nuestro trazado con pocas rectas.
- Controlar con mayor frecuencia los parámetros de rodadura va a permitir asegurar que en todo momento cumplimos con las tolerancias fijadas por el fabricante para servicio comercial, garantizando la seguridad al usuario. Por ello, en esta 2ª Política de Reperfilado se introducen medidas intermedias con el Perfilómetro
- Al medir a los 16.000km con el perfilómetro, si algún parámetro de rodadura no cumple con el límite y/o estimamos que en los 4.000 km siguientes lo va a sobrepasar, se adelanta la entrada al torno de esa unidad para poder asegurar siempre el cumplimiento de los requisitos de seguridad y minimizar la cantidad de rueda a mecanizar al evitar que las unidades entren con la pestaña excesivamente desgastada lo que se traduce en una reducción de costes (al alargar la vida de las ruedas) y una mejora de la seguridad. Se trata de transformar el Mantenimiento PREVENTIVO de la Rodadura, en un MANTENIMIENTO PREDICTIVO o según estado.

6. Agradecimientos

Dedico este artículo a toda mi familia, especialmente a mis padres y hermanos, porque si he tenido la oportunidad de adentrarme en el mundo ferroviario ha sido gracias a sus ánimos, apoyo incondicional y confianza plena. Y a Metro Ligero Oeste por la maravillosa oportunidad que me ha brindado de desarrollar mi carrera profesional en un ambiente tan acogedor y completo.

7. Referencias

- [1] Alstom TLS (2012). SE-01-ES-IT.302.T2.01 Reperfilado Preventivo Ruedas Metro Ligero de Madrid.
- [2] Evans, Jerry (2011) Investigación del Desgaste de Ruedas en Metro Ligero Oeste, n° informe: ITLR T25248-001, Interfleet Technology Ltd.
- [3] Sánchez Molina, José Miguel (2011). Informe sobre el funcionamiento del sistema de rodadura del Citadis 302, en la explotación de Metro Ligero Oeste, MLO.
- [4] Transamo (2004). Manuel descriptif: Mécanique et dimensionnement.
- [5] García García, Emilio (2011-2012) Dinámica y diseño de Material Rodante, Máster en Sistemas Ferroviarios, Universidad Pontificia de Comillas.
- [6] García, M^a Antonia (2011-2012). Ferrocarriles Metropolitanos, urbanos y de cercanías, Máster en Sistemas Ferroviarios, Univ.Pontificia de Comillas.
- [7] Herreros Garrido, Arturo (Abril 2010). Estudio de la Defectología en Ruedas Ferroviarias, Proyecto fin de Carrera Abril 2010, Universidad Carlos III de Madrid.
- [8] González Fernández, Francisco Javier. Fuentes Losa, Julio. Ingeniería Ferroviaria, Ed.UNED, 2ª Edición.
- [9] www.metroligero-oeste.es
- [10] www.alstom.com/transport/

Diseño Operativo, Comercial y Económico del Tren Turístico Train and Breakfast Camino de Santiago

Operational, Commercial and Economic Desing of Tourist Train Train and Breakfast Camino de Santiago

Verónica Álvarez Fernández*

Diseño y Gestión de Proyectos, EPSEVG, Vilanova i la Geltrú

Resumen

El proyecto “*Diseño Operativo, Comercial y Económico del Tren Turístico Train and Breakfast Camino de Santiago*” aborda el estudio de la creación de un nuevo producto ferroviario, que se concibe y diseña con la finalidad de constituir y promover una oferta combinada de turismo y transporte complementaria a la actual, aprovechando el valor que en sí mismo constituye un viaje en ferrocarril y complementándolo con unos servicios turísticos existentes, potenciales y de gran interés para el cliente.

Un proyecto que combina aspectos comerciales y técnicos para abordar de forma completa el desarrollo de un nuevo producto, no sólo definiendo y diseñando el producto en sí, sino abordando todos los factores operacionales que permiten y hacen factible su inmediata implantación y puesta en marcha.

En resumen, un proyecto que analiza y define los procesos comerciales, técnicos, operativos, y económicos necesarios para la implantación de un nuevo producto turístico -ferroviario, desarrollado ajustándose a las necesidades del mercado actual, y constituyendo un producto atractivo, diferente e innovador.

Palabras clave: Diseño, Tren Turístico, Train and Breakfast, Camino de Santiago.

Abstract

The project “Operational, Commercial and Economic Design of Tourist Train “Train and Breakfast Camino de Santiago”, approaches the study of the creation of a new rail product, conceived and designed in order to establish and promote a tourism and transport combined offer; additional to the current, using the value that represents a rail journey and supplementing it with some existing tourism services and of great interest to the client.

A project combining commercial and technical aspects to address completely the development of a new rail product, not only defining and designing the product itself, but considering all operational factors that enable and make possible its immediate implementation and commissioning.

To sum up, a project that examines and defines the commercial, technical, operational, and economic processes necessary for the implementation of a new tourist-rail product, developed according to the requirements of the current market, and constituting an attractive, different and innovative product.

Keywords: Desing, Tourist Train, Train and Breakfast, St. James 'way.

El presente artículo constituye un resumen detallado del proyecto “*Diseño Operativo, Comercial y Económico del Tren Turístico Train and Breakfast Camino de Santiago*”. Con objeto de una mejor comprensión, se estructura describiendo inicialmente de forma comercial el producto planteado, para a continuación, proceder con la explicación de los aspectos técnicos que permiten la definición del mismo.

TRAIN AND BREAKFAST CAMINO DE SANTIAGO

Train and Breakfast es un nuevo producto ferroviario, un nuevo concepto de viaje, un hotel en movimiento que además de los traslados ida y vuelta a tu destino, te alojará a lo largo del viaje en una Cabina Gran Clase equipada con todas las comodidades que puede ofrecerte un verdadero hotel rodante.



1. El producto

Train and Breakfast Camino de Santiago es el viaje que estabas esperando, un viaje de ocho días y siete noches que te permitirá descubrir la magia y la esencia del Camino Francés.

Desde Barcelona, Madrid o Zaragoza recorreremos el camino hasta llegar a Santiago de Compostela, visitando, conociendo y disfrutando de un entorno sin igual.

Un viaje único, que incluye los traslados de ida y vuelta a tu ciudad origen, alojamiento y desayuno buffet, estancia en compartimentos Gran Clase durante todo el viaje y un sin fin de visitas y actividades que te permitirán experimentar en primera persona la magia del camino.

Pensado y diseñado para todo tipo de viajeros, para el viajero aventurero, el gastronómico, para el cultural, para el amante de la arquitectura, la historia, la naturaleza, de la fotografía, del arte. Train and Breakfast les brinda la oportunidad de sumergirse en una experiencia inigualable a bordo de un tren pensado y diseñado exclusivamente para ellos.

Ofrece al viajero-peregrino la posibilidad de realizar las etapas más emblemáticas del camino a pie o en bicicleta, contando tras su llegada a Santiago, con la acreditación oficial “La Compostela”.

Por las mañanas se realizarán las distintas etapas y por las tardes te esperan numerosas actividades y visitas que te permitirán descubrir en primera persona las regiones que bordean la ruta de peregrinación más importante de nuestro país.

Un viaje pensado también para los viajeros que deseen conocer y descubrir la belleza del camino, sus ciudades, sus parajes y sus aldeas, sin tener que realizar las distintas etapas a pie o en bicicleta. Mientras los peregrinos realizan las etapas por las mañanas estos viajeros contarán con visitas, experiencias y actividades que les permitirán descubrir de igual forma la esencia del camino de Santiago.

Al viaje se une la exquisita gastronomía de la zona, recorriendo las regiones gastronómicamente mejor valoradas de nuestro país.

Por las mañanas cogeremos fuerzas tras un succulento desayuno buffet a bordo. Y en las comidas y cenas los viajeros podrán degustar y disfrutar de los exquisitos e incomparables platos de la gran oferta que les ofrece la región.

Conocida es la comida gallega, los vinos, las tapas de León, el cocido de Astorga y un sinfín de platos y especialidades que los viajeros Train and Breakfast tendrán la posibilidad de degustar, contando en los lugares a visitar y puntos fin de etapa con menús concertados e importantes descuentos especialmente para ellos.


Le ofrece al peregrino la tranquilidad y la comodidad de no tener que preocuparse de traslados de equipaje, ni de hacer y deshacer maletas al inicio de cada etapa. El placer de viajar sin tener que preocuparse de buscar alojamiento y transporte, con traslados de ida y vuelta y con un hotel a tu disposición las 24 horas, sin preocuparse por la hora de entrada o salida.

1.1. Programación del viaje

Train and Breakfast Camino de Santiago contará con dos salidas el próximo verano, una el sábado 12 de julio y otra el 9 de agosto con una duración de 8 días/7noches cada viaje.

<i>8 días / 7 noches</i>	
Día#1#	<i>Introducción al Camino</i>
<i>Descubre!/Visita!</i>	Logroño(Burgos)
Día#2#	<i>Riqueza Histórica y Cultural</i>
<i>!Conoce!./Recorre!</i>	León((Astorga(((Ponferrada(
Día#3#	<i>La Belleza de la Naturaleza</i>
<i>!Comienza!./Camino!</i>	Ribeira(Sacra((Cañones(del(Sil((((Monforte(de(Lemos(
Día#4#	<i>La Magia del Camino</i>
<i>!La mejor del interior!</i>	Sarria(((Lugo(
Día#5#	<i>Gastronomía y Termalismo</i>
<i>Experiencias!Únicas!</i>	Lalín(((Arzúa((Ourense(
Día#6#	<i>La Riqueza de la Arquitectura Gallega</i>
<i>!Viaja al pasado!</i>	Vedra((Ribadulla((Padrón(((A(Coruña(
Día#7#	<i>Ciudad y Destino</i>
<i>!La Recompensa!</i>	Santiago(de(Compostela(
Día#8#	<i>Deshaciendo el Camino</i>
<i>!El regreso!</i>	
<i>((Train and Breakfast(((¿Te lo vas a perder?!</i>	

*Train and Breakfast
Camino de Santiago,
una oportunidad única
para descubrir el camino
desde la ventanilla del ferrocarril.*



Programa del viaje

Los dos primeros días se desarrollarán actividades de integración y conocimiento del camino, visitando algunas de las ciudades más importantes a su paso.

Los últimos cinco días comienza la verdadera aventura, los viajeros que así lo deseen realizarán el camino a pie y en bicicleta, mientras que los que se decanten por las visitas descubrirán la esencia del camino disfrutando de numerosas experiencias especialmente pensadas para ellos.

Etapas que realizarán los peregrinos:

CAMINANTES		
	1ª	Sarria – Portomarín
	2ª	Portomarín – Palas de Rei
	3ª	Palas de Rei – Arzúa
	4ª	Arzúa – O Pedrouzo
	5ª	O Pedrouzo – Santiago
CICLISTAS		
	1ª	Ponferrada – O Cebreiro
	2ª	O Cebreiro - Sarria
	3ª	Sarria – Palas de Rei
	4ª	Palas de Rei – O Pedrouzo
	5ª	O Pedrouzo – Santiago

1.1. El Tren del Camino

TRAIN AND BREAKFAST

El viajero estará inmerso en un espacio moderno y actual que le hará sentirse como en casa.



La composición Train and Breakfast cuenta con Cabinas Gran Clase en las que en su diseño se ha cuidado cada detalle creando un ambiente único que nos permite garantizar al viajero un alto grado de confort y comodidad.

Train and Breakfast se compone de dos salones, dos coches restaurante, un coche cafetería central y doce coches cama gran clase, además de los coches extremos y el coche de la tripulación.

Está pensado y diseñado única y exclusivamente para el uso y disfrute del viajero, porque no hay nada más importante para nosotros que poder proporcionarle una experiencia inolvidable.



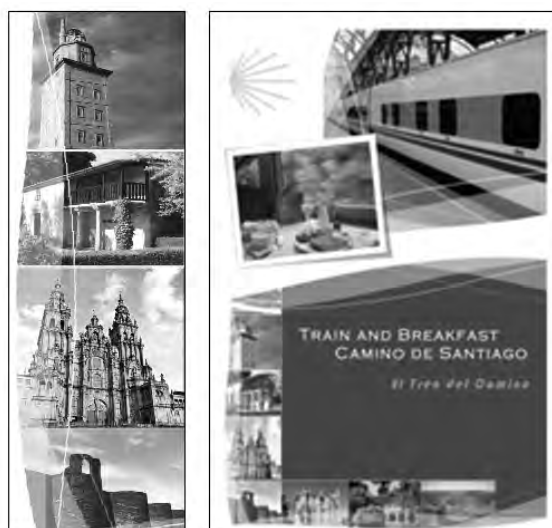
1.2. Tarifas

El paquete turístico incluye:

- Recepción de viajeros en las estaciones de Barcelona Sants y Zaragoza Delicias.
- Alojamiento en Cabina Gran Clase.
- Desayuno buffet.
- Servicio de cafetería las 24 horas.
- Entrega diaria del “Diario del Peregrino Train and Breakfast”.
- Traslados en autocar al inicio y fin de cada etapa.
- Información detallada de cada etapa y de las distintas ciudades y lugares de camino.
- Traslados para realización de las diferentes visitas turísticas.
- Actividades a bordo.
- Guía turístico de acompañamiento en las actividades turísticas.
- Prensa diaria y revistas siempre a la disposición del cliente.
- Un excelente equipo humano a su disposición.
- Oferta audiovisual enfocada al motivo del viaje.
- Seguro de Viaje.

TARIFAS (IVA Incluido)	
Precio adulto en habitación doble en régimen A/D	769,99 €/pax
Precio adulto en habitación Individual en régimen A/D	969,99 €/pax
Precio menor (entre 4-14 años) en habitación doble en régimen A/D	249,99 €/niño
**Niños menores de cuatro años incluidos. Un máximo de dos niños por cabina.	
Suplemento por bicicleta	30 €/bicicleta

**Plazas modalidad bicicleta limitadas a 40 bicicletas/viaje.*



Hasta este punto se ha realizado una definición y descripción comercial del producto diseñado, a continuación, se exponen de forma resumida los contenidos específicos abordados en el proyecto, y que hacen factible la viabilidad técnica y económica del producto propuesto.

2. Alcance y desarrollo del proyecto

El producto que viene de definirse es el resultado del estudio que abarca el proyecto realizado, es decir, el objeto del proyecto es analizar todos los factores necesarios para poder diseñar e implantar un producto turístico-ferroviario y que este sea viable técnica y económicamente.

El proyecto contempla el diseño y la futura implantación de un tren turístico, para ello, y dadas las peculiaridades de este tipo de servicio ferroviario (servicios a bordo, acompañamiento operacional, logística de aprovisionamientos, peculiaridad y distinción en las operaciones ferroviarias, características propias en la comercialización y promoción del mismo, material móvil, etc.) se han estudiado y analizado en profundidad los siguientes contenidos:

- Estudio Comercial
- Material Rodante
- Estudio Operativo
- Logística de personal, servicios y suministros.
- Estudio y análisis de costes
- Estudio de Rentabilidad

2.1. Estudio comercial

El estudio comercial de una nueva oferta es uno de los elementos principales a desarrollar, en él se define el producto y las características del mismo, se analiza y estudia la existencia de productos similares, así como las directrices a seguir para el desarrollo de un producto ferroviario de estas características. Está directamente relacionado con los aspectos técnicos, influenciado por el material seleccionado, la infraestructura, el programa de viaje, etc., recogiendo los resultados obtenidos en los demás anejos.

En el estudio comercial se plantea la idea, los demás anejos la analizan técnica, comercial y económicamente, y para concluir, el estudio retoma la idea inicial, estableciendo y definiendo las directrices necesarias que hacen factible la implantación del producto final.

En el estudio comercial se abarca desde el diseño, la definición y la descripción del producto propuesto, calendarios de implantación, estrategias de promoción, comunicación, estrategias de marketing y venta (producto, público objetivo, tarifas, canal, promoción) a adoptar para garantizar el éxito de la propuesta definida.

Train and Breakfast como Producto

El proyecto contempla la creación de un nuevo producto ferroviario con el objetivo de promover una oferta combinada de transporte y turismo complementaria a la actual, aprovechando un nicho de negocio no cubierto y utilizando material de última generación Talgo Tren-Hotel Serie 7 que se comercializará con la marca propia "*TRAIN AND BREAKFAST*".

El objetivo de la denominación de un nombre específico que sirva como base para los diferentes trayectos es la creación de una nueva marca, con la finalidad de diferenciar y potencializar el producto en sí mismo, aportando un valor diferencial de los diferentes servicios a realizar.

Partiendo de una misma composición de material móvil se definirán distintos tipos de servicios turísticos:

Trenes Temáticos: El origen de estos trenes turísticos se basa en que la ruta a realizar gira en torno a un concepto central, con el fin de construir un producto desde la identidad del destino.

Trenes Evento / Actividad: El origen de este tipo de trenes turísticos coincidirá con una festividad, acto, evento o actividad de gran interés para el cliente, ofreciendo al viajero realizar y formar parte de los actos más importantes de nuestro país.

El objeto final del estudio comercial, así como del proyecto, ha sido definir en profundidad el producto *Train and Breakfast Camino de Santiago*, englobado dentro de los definidos como trenes temáticos.

2.2. Material Rodante

El material rodante condiciona las características del viaje, tanto comerciales, a la hora de dirigirnos a un determinado público, como operativas en función de las necesidades a tratar.

Se propone hacer uso de material Talgo Tren Hotel Serie 7, aprovechando la existencia en stock de este tipo de material de última generación, con la consecuente ventaja de una disponibilidad prácticamente inmediata, además de que su estructura e instalaciones se adecuan satisfactoriamente permitiendo englobar todos los servicios de transporte, alojamiento y restauración a bordo.

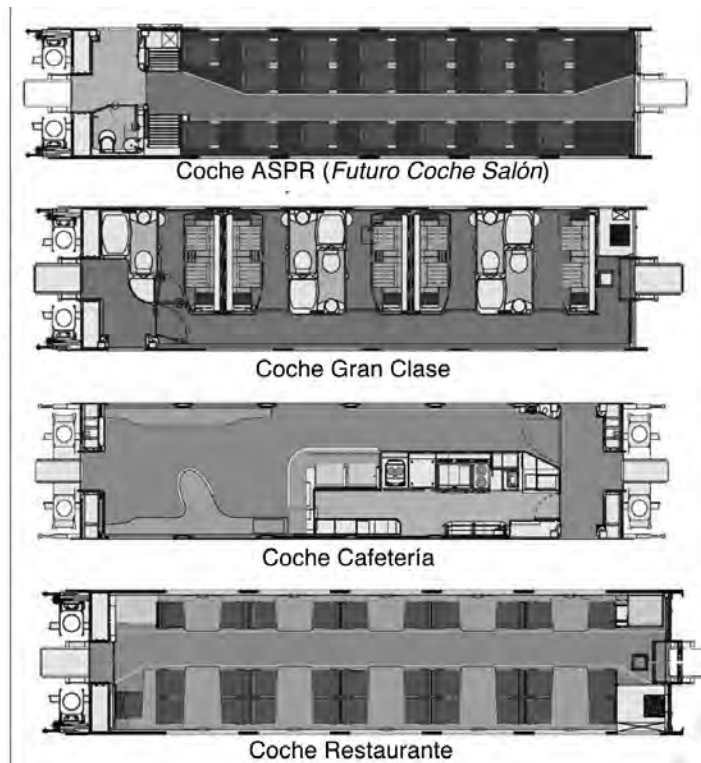
De material móvil se ha contemplado desde la formación de la composición, justificación de la elección de material, características técnicas y operativas, prestaciones a los clientes, sistemas de tracción, planes de seguridad y evacuación en diferentes condiciones del viaje, hasta justificaciones de sostenibilidad y medio ambiente.

La Composición Train and Breakfast tendrá una capacidad de 132 plazas, incluyendo dos plazas PMR (personas de movilidad reducida).

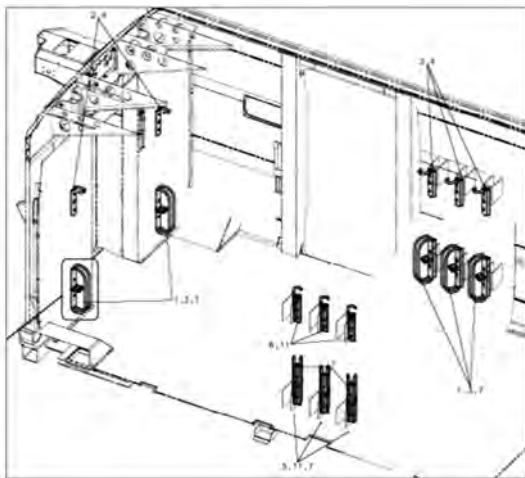
Se realizarán modificaciones en los coches extremo con objeto de dotarlos de sistemas porta-bicicletas. Así mismo, se reestructurarán los coches butacas para conformarlos en coches salón para mejorar la comodidad de los viajeros.

La composición se constituirá de veinte coches:

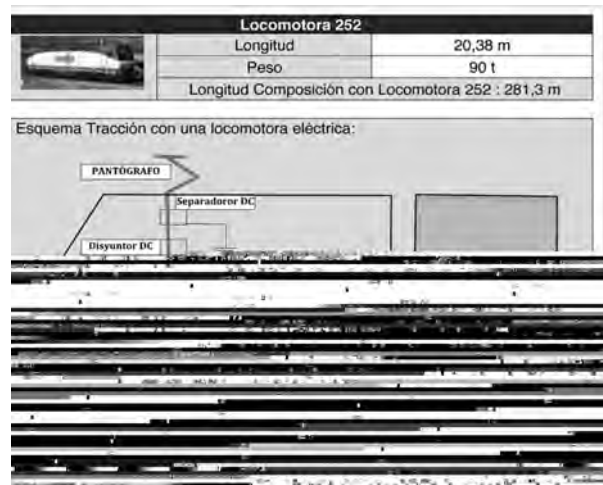
- Dos coches extremo
- Trece coches cama con cinco cabinas gran clase dobles cada uno
- Un coche cama con cabina gran clase doble PMR
- Un coche cafetería
- Dos coches restaurante
- Y un coche salón (modificación de un coche ASPR actual)



Representación gráfica de algunos de los principales coches que constituyen la composición.



Detalle instalación sistema Porta-Bicis



Esquema de Tracción con Locomotora Eléctrica 252



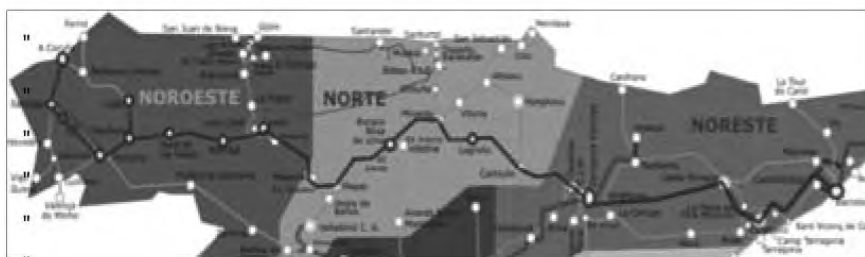
Representación gráfica de una composición TTH Serie 7 constituida por 9 coches.

2.3. Estudio operativo

El estudio operativo tiene como finalidad estudiar y analizar los distintos segmentos, procesos y operaciones ferroviarias necesarias e imprescindibles para que el desarrollo del viaje sea posible técnicamente.

En él se analiza la viabilidad del itinerario planteado, se detalla el programa del viaje a nivel de operaciones ferroviarias, se describen en profundidad los diferentes trayectos a realizar detallando sus características y peculiaridades.

Contempla el recorrido a realizar, estaciones y análisis de estaciones a utilizar, estacionamientos diurnos e implicaciones que estos conllevan, pernoctaciones en estaciones, logística de mantenimiento en ruta (operaciones de cambio de ancho, cambios de tracción, abastecimientos de agua, limpieza de aguas sucias, gestión de mantenimiento a bordo, maniobras de material, etc.).





2.4. Logística de personal, servicios y suministros

El estudio de logística de personal, servicios y suministros tiene como finalidad definir el personal necesario para el desarrollo de las actividades, así como definir los diferentes servicios que se realizarán a bordo con la finalidad de describir las exigencias y las características que los caracterizan y que será necesario llevar a cabo para poder garantizar un buen desarrollo del viaje.

En el estudio de personal, servicio y suministros se han considerado desde personal de acompañamiento, personal a bordo, personal exterior, restauraciones, servicio de cafetería, recepción, cocina, limpieza, actividades, servicios adicionales de transporte como autobús y transporte de bicicletas, suministros de restauración y dotaciones necesarias para el buen funcionamiento del tren turístico.



Servicios a bordo: Restauración y Tripulación

MONFORTE DE LEMOS	
TIPO ESTACIÓN Categoría 2	<p>Día 3 y Día 4 estacionamiento en andenes secundarios. Día 3: Llegada a Monforte a las 8h00. Salida 10h30. Día 3 / Día4: Llegada a Monforte a las18h00. Salida a las 05h58. Pernoctación en Monforte de Lemos. Uso de andenes: Día 3: Principal 30 min. Secundario 120 min. A efecto canon 120 min. Día 3/ Día 4: Principal 15 minutos. Secundario 825 min. A efecto de canon por utilización de andenes: 450 min.</p> 
INSTALACIONES	<p>Longitud composición con locomotora 334 (dos locomotoras) : 303,92 m Longitud composición con locomotora 252 : 281,3 m</p> <p>Posibilidad de estacionamiento en vías con andén: VÍA 1: Andén ~:332 m (Longitud vía: 515 m). Andén contiguo a estación. VÍA 2: Andén ~:300 m (Longitud vía: 571 m) VÍA 3: Andén ~:300 m (Longitud vía: 441 m) VÍA 4: Andén ~:300 m (Longitud vía: 441 m) VÍA 5: Andén ~:300 m (Longitud vía: 433 m)**</p> <p>La estación cuenta con numerosas instalaciones (talleres, depósitos, almacenes) donde es posible conectar la toma de agua de una manguera para abastecer la composición Tren-Hotel. Así mismo el acceso de un camión cisterna a una vía es factible.</p>  <p style="text-align: center;"><i>Vista aérea de las instalaciones de la estación de Monforte de Lemos</i></p>
	<p>** La parada en Monforte de Lemos se realiza: - Estacionamiento durante la tarde y visita turística Monforte de Lemos. (Vía 5) - Pernoctación. (Vía 5)</p> <p>(Preferible antes de iniciar traslado a Lugo Vía 1)</p> <p>Servicios de la estación: - Cafetería - Vestíbulo Zona Comercial - Aseos - Cajero automático</p>
Acceso y Páreo de Coches	<p>En la siguiente imagen se destacan las zonas de acceso y aparcamiento de la estación:</p>  <p>En esta estación el acceso y el estacionamiento de los dos autobuses así como de furgonetas para abastecimiento externo no supondría ningún inconveniente.</p>

Ficha Ejemplo de las Instalaciones de una Estación

2.5. Estudio y análisis de costes

La finalidad del estudio de costes es analizar los distintos costes que intervienen en la puesta en marcha del servicio turístico del tren “Train and Breakfast Camino de Santiago”, con el objeto de obtener los datos y valores necesarios que permitan tener suficiente información para realizar una toma de decisiones de forma lógica y justificada a la hora de establecer las tarifas comerciales del servicio a aplicar.

Para ello se ha determinado y explicado la obtención de cada coste y la explicación de los costes considerados.

A continuación se numeran los costes que generará el nuevo servicio y que han sido necesarios analizar y considerar:

- **Energía de Tracción**

- **Mantenimiento**

**Incluye costes fijos (amortizaciones, repercusiones en talleres, amortizaciones del parque de reserva, etc.)

- **Cánones**

Cánones por utilización de las líneas ferroviarias integrantes en la REFIG

Cánones por utilización de las estaciones y otras instalaciones ferroviarias

- **Costes Internos**

Personal interno

- **Costes Externos**

Autobús

Personal externo

- **Costes Varios**

Gestión Talgo

Personal mantenimiento

Personal de limpieza

Trabajos de limpieza de aguas sucias

Equipamiento

Sábanas/Mantas/Toallas/Mantelería

Neceseres/Amenities

Equipos de limpieza (útiles y productos)

Restauración

Desayuno

Copa de bienvenida y aperitivos

Otros

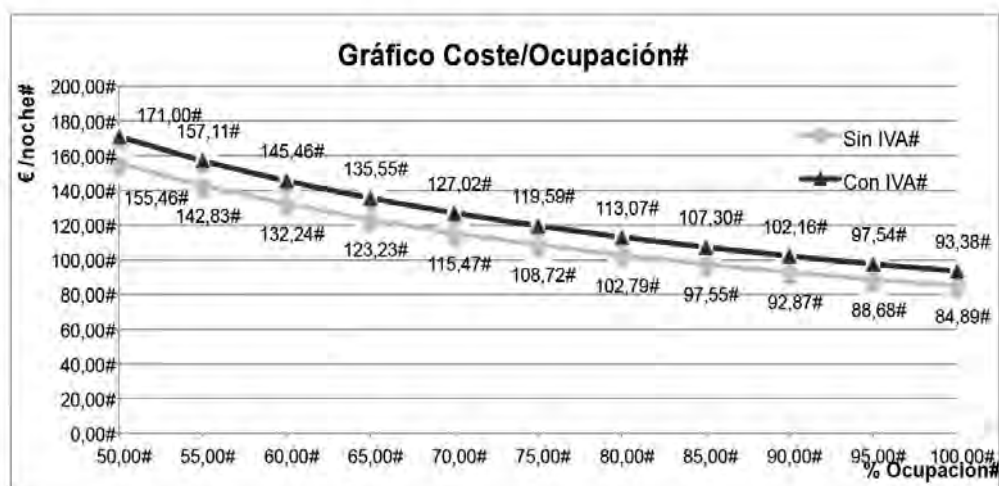
Prensa y Revistas

Check-In

Uso de Salas Club

**No se han considerado en este estudio costes propios (financieros, de gestión, etc.).

Una vez definida y justificada la obtención de cada coste y con el objeto de obtener un orden de magnitud de los gastos que implica un servicio de estas características, se han realizado análisis de importancia de costes, estudios de variabilidad de costes, definición de costes en función de la ocupación, en función de la duración del viaje, inter-relaciones entre ellos, etc. Estos datos han sido representados gráficamente y analizados en profundidad para servir de referencia a la hora de toma de decisiones.



	Duración del Viaje!									
	3 días/ 2noches!	4 días/ 3noches!	5 días/ 4noches!	6 días/ 5noches!	7 días/ 6noches!	8 días/ 7noches!	9 días/ 8noches!	10 días/ 9noches!	11 días/ 10noches!	12 días/ 11noches!
100,00!	233,03	168,91	134,96	116,55	102,83	92,94	86,72	81,92	76,93	74,05
95,00!	245,04	177,62	141,92	122,56	108,13	97,73	91,19	86,15	80,89	77,86
90,00!	258,36	187,27	149,63	129,22	114,01	103,04	96,15	90,83	85,29	82,10
85,00!	273,21	198,04	158,23	136,65	120,56	108,96	101,67	96,05	90,19	86,81
80,00!	289,87	210,11	167,88	144,98	127,91	115,60	107,87	101,90	95,69	92,11
75,00!	308,69	223,76	178,78	154,40	136,22	123,11	114,88	108,52	101,90	98,09
70,00!	330,13	239,29	191,19	165,12	145,68	131,66	122,85	116,06	108,98	104,90
65,00!	354,77	257,15	205,46	177,44	156,55	141,48	132,02	124,72	117,11	112,73
60,00!	383,38	277,89	222,03	191,75	169,18	152,89	142,67	134,78	126,56	121,82
55,00!	417,01	302,27	241,51	208,57	184,02	166,31	155,18	146,60	137,66	132,51
50,00!	457,10	331,33	264,73	228,63	201,71	182,30	170,11	160,69	150,90	145,25

2.6. Estudio de rentabilidad

El objeto de la realización del estudio de rentabilidad es analizar a corto y medio plazo la rentabilidad obtenida de la inversión inicial que es necesaria llevar a cabo para poder ejecutar el tren turístico Train and Breakfast Camino de Santiago.

La elaboración del estudio se ha basado en la utilización de diferentes hipótesis debidamente analizadas y justificadas que han permitido establecer unos criterios consensuados para prever la evolución del producto.

Las principales hipótesis consideradas se corresponden con las siguientes:

- Hipótesis de Ocupación
- Hipótesis de Ingresos
- Hipótesis de Evolución Temporal

La hipótesis de ocupación utilizada para el cálculo de este anexo se corresponde con una ocupación del 85% en plazas convertidas, definiendo plazas convertidas como el número de plazas que se corresponden con una ocupación del 85% en base a la diferencia de modalidades del viaje (cabina doble ocupada por dos viajeros o cabina doble ocupada por un único viajero).

OCUPACIÓN		
Ocupación	Plazas	Plazas convertidas
100 %	120	102
95 %	114	97
90 %	108	92
85 %	102	87
80 %	96	82
75 %	90	77
70 %	84	72
65 %	78	67
60 %	72	62
55 %	66	57
50 %	60	52

Plazas en función del Porcentaje de Ocupación

La hipótesis de ingresos adoptada coincide con la situación más desfavorable para una ocupación del 85% en plazas convertidas, habiendo desarrollado distintas hipótesis con las tarifas establecidas en función de las distintas modalidades del viaje (adulto individual, adulto doble, familia con niños, menor, etc.).

La hipótesis de evolución temporal concluye que con el paso de los años, el producto se consolidará, constituyendo una marca de referencia en sí mismo y esto permitirá un aumento de los viajes a realizar así como un aumento en la ocupación de los mismos.

La elaboración del estudio de rentabilidad se ha realizado en base a las hipótesis más conservadoras.

2014	2015	2016	2017
85 % Ocup	85 % Ocup	90 % Ocup	90 % Ocup
87 Viajeros	87 Viajeros	92 Viajeros	92 Viajeros
769,99 €/viajero	799,99 €/viajero	829,99 €/viajero	849,99 €/viajero
2 Viajes	4 Viajes	5 Viajes	6 Viajes

Rentabilidad (%)	0,57	2,95	11,28	12,27
-------------------------	-------------	-------------	--------------	--------------

Resumen Hipótesis y Rentabilidad Económica del Producto a Corto Plazo

3. Conclusiones

El proyecto “Diseño Operativo, Comercial y Económico Train and Breakfast Camino de Santiago” es un proyecto real y aplicable en su totalidad, desarrollado ajustado a las necesidades del mercado actual.

Un proyecto completo que cuenta con el estudio y la documentación necesaria para que cualquier operador pueda efectuar la implantación inmediata de la propuesta realizada.

Como producto:

Train and Breakfast Camino de Santiago es una apuesta por un producto con capacidad de perduración en la oferta futura, constituye una oferta atractiva, innovadora, diferente, competitiva y ajustada a la demanda actual, es un producto con gran capacidad de penetración en el mercado y que tras una importante labor inicial de lanzamiento, promoción y comunicación se consolidará como producto de ocio de referencia en nuestro país.

Otra de las claves del producto es que hablamos de un producto rentable económicamente, con un lanzamiento moderado en número de trayectos a realizar dada la reciente campaña de promoción, pero que tras su implantación y desarrollo se consolidará, permitiendo el aumento de trayectos anuales con un importante aumento en sus beneficios..

4. Agradecimientos

La autora quiere expresar su especial agradecimiento a Alberto García Álvarez, Rodrigo Hilario Noailles y Félix A. Martín Merino, por su dedicación e implicación en el desarrollo del proyecto.

5. Bibliografía**Referencias Bibliográficas**

- [1] García Álvarez, A, Cintero Hernández, A y Jericó Rodríguez, P “ Operación de Trenes de Viajeros, Claves para la gestión avanzada del ferrocarril”. 2ª Edición. Febrero 2011.
- [2] García Álvarez, A, “Magnitudes, unidades y conceptos básicos del transporte de viajeros. El “Load factor en el ferrocarril”, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Edición 14. Marzo 2011.
- [3] García Álvarez, A, “Costes Operativos de los servicios de Transporte de viajeros por ferrocarril”, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Edición 1. Abril 2011.

Otra documentación

- [4] Documentación aportada en el transcurso de las prácticas profesionales con Renfe Operadora.

Extensión del ancho UIC a Zaragoza para trenes de mercancías

Extension of UIC gauge to Zaragoza for freight trains

Eduardo Palacín Biarge*

Gerencia de Área de Premantenimiento y Tecnología, Ineco

Resumen

Se pretende estudiar las posibles opciones para permitir, en el corto plazo y con una inversión mínima, la operación de trenes de mercancías de 750m en ancho estándar hasta el entorno de Zaragoza. Se busca elegir la mejor alternativa teniendo en cuenta tanto los intereses del administrador de infraestructuras como los del operador ferroviario.

Palabras clave: Zaragoza, ancho estándar, ancho mixto, trenes de mercancías.

Abstract

We intend to study possible options to allow, in the short term with a minimum investment, the operation of freight trains of 750m in standard gauge until the surroundings of Zaragoza. The aim is to choose the best option, taking into account both infrastructure manager and railway operator interests.

Keywords: Zaragoza, standard gauge, mixed gauge, freight trains.

* palacinbiarge@gmail.com

1. Introducción

La cuota de transporte de mercancías por ferrocarril entre la Península Ibérica y el resto del continente europeo representa un pequeño porcentaje en comparación al transporte por carretera y al marítimo. En España, dicha cuota no alcanza el 5% mientras que en la UE supera el 15% (datos de *Eurostat*, 2012)

Es conocida la actual diferencia de ancho de vía entre la Península Ibérica con respecto a la Unión Europea; esta diferencia de 233 milímetros, entre el ancho ibérico y el estándar, obliga a la ruptura de carga en la frontera de los trenes de mercancías que cruzan los Pirineos. Estas operaciones tienen una duración entorno a cinco horas con el consiguiente incremento de costes.

Tras el apoyo y apuesta de los diferentes Gobiernos de España por la implantación del ancho 1435 mm en el Corredor Mediterráneo, en mi opinión, se debe continuar el proceso, extendiéndolo al resto de la Red de Interés General Ferroviaria, permitiendo así en un futuro a medio plazo la migración completa de la Red y el fin del problema de la diferencia del ancho de vía, existente entre la Península Ibérica y la Europa Comunitaria. Además también permite crear economías de red para los operadores de mercancías asentados en España que operen en ancho estándar.

En este artículo se pretende estudiar diferentes alternativas para extender al entorno de Zaragoza el ancho 1435mm para los trenes de mercancías, aprovechando las infraestructuras existentes y las previstas en el corto plazo, con una inversión mínima a realizar; ya que la LAV Madrid – Barcelona es una línea exclusiva para viajeros.

2. ¿Por qué Zaragoza?

Se define Zaragoza como primer hito de la extensión del ancho estándar hacia la España de interior ya que Aragón, además de ser fronterizo con Francia, cuenta con una posición geográfica estratégica en la Península Ibérica, en un radio de 300 km viven más de 25 millones de habitantes y se concentra alrededor del 60% del Producto Interior Bruto nacional (datos de *Aragón Exterior*, 2012). Además en Zaragoza radican importantes empresas y que implican un gran volumen de transporte de mercancías fuera de la Península Ibérica, tales como BSH (electrodomésticos), Saica (papel y cartón), Samca (varios), General Motors (automóviles) y Arcelormittal (siderúrgicos).

Como dato, indicar que Aragón en 2011, según el *Instituto Aragonés de Estadística (IAEST)*, exportó bienes de consumo por un valor de 9.267 millones de euros e importó bienes por un valor de 7.700 millones de euros, siendo la Unión Europea el destino y origen de alrededor de las tres cuartas partes de estas exportaciones e importaciones. También indicar que en los últimos años, según se extrae del *Observatorio del Ferrocarril en España*, la provincia de Zaragoza ha sido uno de los principales origen y destino del tráfico internacional en vagón completo de España.

3. Grado de saturación de la Red actual

En primer lugar, necesitamos calcular el grado de saturación de la red actual, para poder determinar si existe un excedente de capacidad que permita absorber un incremento de circulaciones en el ámbito de estudio. Una vez calculado, nos permitirá determinar si la alternativa de implantar el ancho estándar sobre la red actual es una alternativa viable. Para ello, se necesita conocer el tráfico actual tanto de viajeros como de mercancías (datos del *CIRTRA*, 2011) y la capacidad que presenta cada uno de los diferentes tramos que componen este conjunto de vías únicas y dobles. La capacidad no es fácil de determinar ya que aparte de depender de las características del tramo en cuestión, depende de la tipología de tráfico e incluso depende de parámetros relacionados con la propia explotación como son, por ejemplo, las paradas efectuadas y los tiempos de parada.

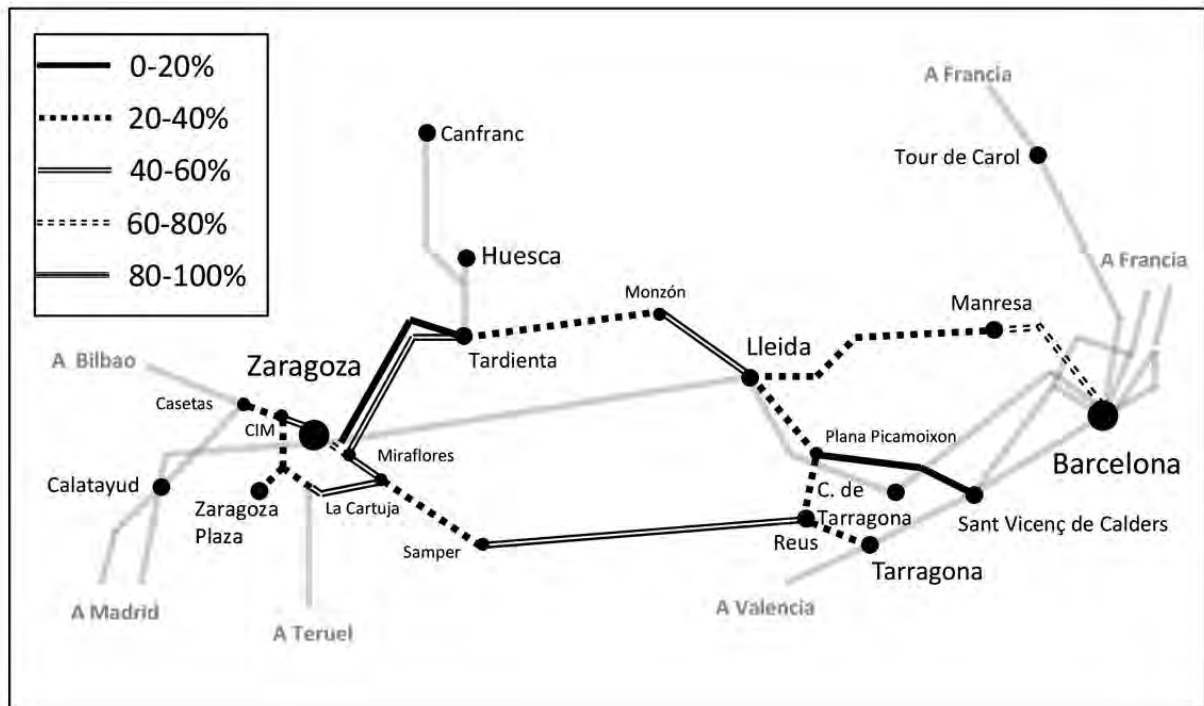


Fig. 1. Estimación del grado de saturación del ámbito de estudio. Fuente: elaboración propia

Una vez estimado el grado de saturación de los diferentes tramos, se pretende determinar si existe capacidad potencial de las distintas líneas que permitan absorber un aumento de las circulaciones, para ello consideramos los valores que se indican en la ficha UIC 406:

Tipo de Línea	En hora punta	A lo largo de un día
Línea dedicada al tráfico de cercanías	85%	70%
Línea dedicada a servicios de alta velocidad	75%	60%
Línea de tráfico mixto	75%	60%

Tabla 2. Grado de Saturación a partir del cual una línea está saturada. Fuente: Ficha UIC 406

La ficha UIC 406 establece en un 60% el grado de saturación diario como indicador de congestión para una línea de tráfico mixto. Comparando este valor con la Figura 1 que representa el grado de saturación a lo largo del día para los distintos tramos, se puede afirmar que en todos los tramos existe un potencial de capacidad que puede absorber actualmente un incremento de circulaciones, salvo los tramos Bif. Canfranc – Canfranc, Manresa – Barcelona y Zaragoza Delicias – Miraflores. En el primero debido a instalaciones obsoletas y a cantones de gran longitud; en los dos últimos, se trata de tramos con servicios de Cercanías. De todos modos, en los tramos con un grado de saturación comprendido entre el 40% y el 60% será necesario estudiar el grado de saturación en hora punta, considerando el valor de 75% que indica la ficha UIC 406.

4. Implantación del ancho 1435mm sobre la Red actual

A la vista del nivel de saturación que presenta la red estudiada, es el momento de elegir que alternativa se va a estudiar en detalle que permita un transporte de mercancías por ferrocarril desde / hacia Zaragoza sin ruptura de carga y que además sea factible en el menor plazo posible.

Una solución vendría por la construcción de una nueva infraestructura, como es la Travesía Central de los Pirineos, que supondría un túnel que atravesara la cordillera pirenaica dando como resultado una Línea de Alta Velocidad de tráfico mixto. Esta opción no se va a considerar en este artículo ya que se pretende ofrecer una alternativa que sea viable en el corto plazo y actualmente, con el presente contexto económico-financiero, se considera que no es abordable.

Otra propuesta que permitiría un tráfico de mercancías entre Zaragoza y Europa sin ruptura de carga sería la reapertura de la línea Zaragoza – Canfranc – Pau (Francia) en ancho estándar, que pese a suponer este paso el recorrido más corto desde Zaragoza con la mayoría de centros europeos frente a los pasos fronterizos actuales, implica unos condicionantes de explotación mayores debido a las rampas características que presenta, en especial, la parte francesa sentido España. Estos condicionantes de explotación son trenes cortos y necesidad de doble tracción entre Canfranc y Bedous (Francia), según se detalla en el estudio *Posibilidad y viabilidad para la reapertura del Canfranc*. Por otra parte, no hay que olvidar la inversión necesaria para realizar las actuaciones de mejora en la infraestructura, electrificación de la línea y renovación total de sus instalaciones, así como la necesidad de contar con el compromiso tanto del gobierno español como del gobierno galo. De todos modos, los diferentes Gobiernos involucrados señalan el horizonte de 2020 para que se produzca la reapertura de esta línea.

En el supuesto que nos vamos a centrar en este artículo es en la implantación del ancho estándar sobre la red existente, dando continuidad hasta Zaragoza y su entorno al ancho 1435mm que está previsto implantar, con horizonte temporal establecido, en el Corredor Mediterráneo. Esta alternativa supone un coste de oportunidad frente a otras opciones más alejadas y difusas en el tiempo, que con una inversión mínima, permitirá el transporte de mercancías por ferrocarril en ancho estándar entre Zaragoza y Europa, continuando así con las actuaciones de implantación del ancho estándar que se están realizando en el Corredor Mediterráneo, que en un plazo casi inmediato se extenderá desde la Frontera Francesa hasta Tarragona.

De las diferentes opciones que se presentan para extender el ancho estándar sobre la red actual entre el Corredor Mediterráneo y el entorno de Zaragoza, se descarta de este estudio la alternativa Zaragoza – Tardienta – Lleida – Manresa – Corredor Mediterráneo, ya que representa una mayor rampa característica (superior a 20 milésimas) frente a otras opciones, por el alto grado de saturación que presenta y la necesidad que obliga de construir una conexión de enlace con el Corredor Mediterráneo. Otra opción que tampoco vamos a estudiar es aquella que configuran los diferentes tramos de la relación Zaragoza – Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Sant Vicenç de Calders, ya que no favorece una conexión con las terminales de Constantí y Tarragona Clasificació en ancho estándar como sí que lo hace la alternativa Zaragoza – Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus – Tarragona, que no deja de suponer una actuación muy similar. La opción Zaragoza – Samper – Reus – Tarragona se descarta ya que esta línea se renovó recientemente en comparación con el tramo Tardienta – Lleida, pero sin embargo sí que se va a estudiar en detalle la alternativa que afectaría a los tramos Zaragoza – Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus – Tarragona y Zaragoza – Samper – Reus, ya que esta opción permite seguir manteniendo el sentido preferente actual de circulación por cada itinerario¹.

¹ Los tramos Zaragoza – Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus y Miraflores (Zaragoza) – Samper – Reus, ambos en vía única, se explotan actualmente con sentido preferente de circulación, es decir, los trenes de mercancías con sentido ascendente circulan por el itinerario Zaragoza – Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus / Sant Vicenç de Calders y los trenes con sentido descendente circulan por el itinerario Zaragoza – Samper – Reus, comportándose, en cierta manera, como si de una vía doble se tratara.

5. Opción A: Zaragoza – Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus – Tarragona. Tramo Tardienta – Lleida en ancho 1435 mm y Lleida – Tarragona en ancho 1668 / 1435 mm

5.1. Descripción

Esta alternativa supone la implantación del ancho estándar en los tramos: Tardienta – Lleida (vía única 1435 mm), Lleida – La Plana de Picamoixons (vía única 1668 / 1435 mm), La Plana de Picamoixons – Reus (vía única 1668 / 1435 mm) y Reus – Tarragona (vía doble, ambas en 1668 / 1435 mm). Esta propuesta segrega el tráfico origen / destino Madrid / Cordillera Cantábrica con destino / origen Cataluña en ancho 1668mm por el tramo Zaragoza – Reus y el tráfico de mercancías origen / destino Zaragoza con destino / origen Corredor Mediterráneo / Europa a través de los tramos Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus. Esto implica que la línea 210 (Miraflores – Samper – Reus – Tarragona) deberá absorber todas las circulaciones (en ambos sentidos) de mercancías con ancho 1668 mm y acabar con el sentido preferente de circulación que existe actualmente en las circulaciones comprendidas entre Aragón y Cataluña de trenes de mercancías. Por tanto, es necesario estudiar minuciosamente la capacidad para el tramo Miraflores – Reus (tramo en vía única) con este nuevo criterio de explotación.

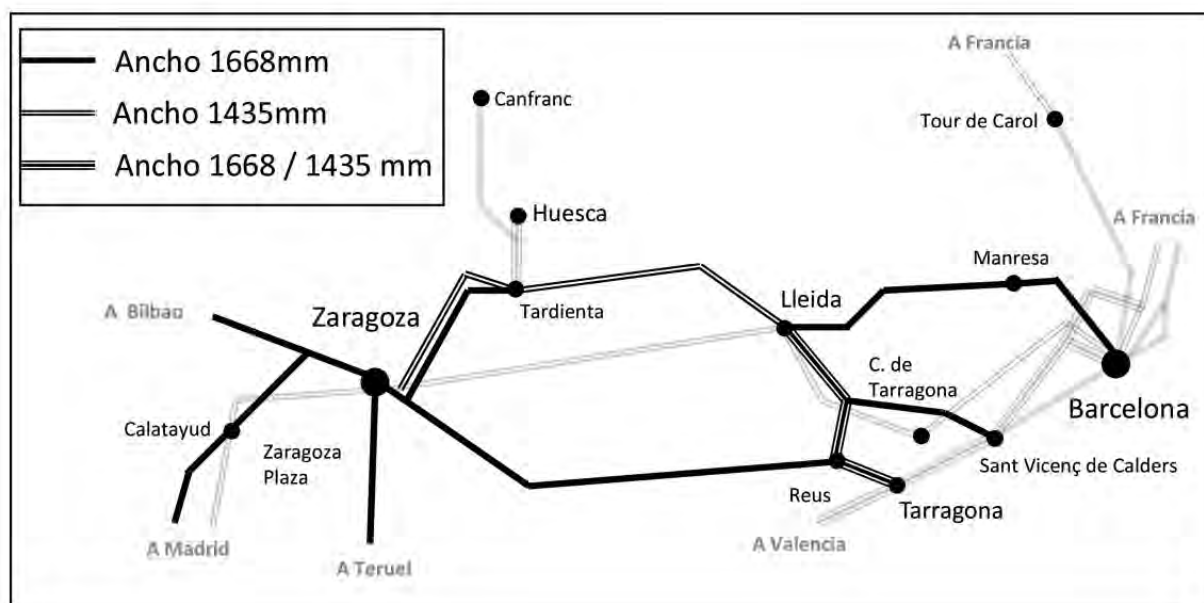


Fig. 2. Esquema de la opción A. Fuente: elaboración propia

En el tramo Tardienta – Lleida-Pirineus no existen centros importantes de atracción / generación de mercancías por ferrocarril, la única terminal de mercancías es Selgua que conecta con la Terminal Intermodal Monzón, siendo su principal relación con el Port de Barcelona, por lo que estaría garantizada la conexión, aunque en ancho 1435mm. Por otra parte, los servicios de Media Distancia actuales se pueden mantener aunque operados en ancho 1435mm y además, sería necesario programar por la línea 210 (Miraflores – Samper – Tarragona) el tren de Larga Distancia entre Madrid y Barcelona (sin paradas en el tramo), que circula por la Red de 1668mm. En el resto de tramos, para mantener los actuales servicios de Media Distancia (Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus / Sant Vicenç de Calders – Barcelona, Ribarroje D’Ebre / Flix / Mora La Nova – Barcelona, etc.) es necesario implantar el ancho mixto (1668/1435mm) al tratarse de tramos en vía única, en el caso de Reus – Tarragona (vía doble) se considera, tras el estudio realizado de capacidad, que será necesario implantar el ancho mixto en ambas vías.

5.2. Capacidad diaria tramo Miraflores – Reus (tramo en vía única)

La situación pésima es precisamente durante la ejecución de las obras, ya que la migración al ancho estándar del tramo Tardienta – Lleida, derivará todo el tráfico de mercancías que soportan ambas vías, en la línea 210 (Miraflores – Reus – Tarragona). Para determinar la capacidad que admitiría esta línea, se realiza el estudio considerando intervalos de tres horas, ya que determina una capacidad más realista al tratarse de una línea con tráfico heterogéneo. Dentro de los diferentes intervalos posibles, elegimos aquel en el que están programados el mayor número de trenes de viajeros, respetando su horario actual debido a que suelen programarse de acuerdo a trasbordos con otros trenes.

La malla simulada da como resultado una capacidad media de 9 trenes (6 mercantes y 3 de viajeros) en el periodo considerado (3 horas). Por lo que se puede determinar la capacidad a lo largo del día, reservando tres horas de banda de mantenimiento, en 63 trenes/día siendo 21 trenes de viajeros y 42 de mercancías. Por lo que con los datos de tráfico actuales, en el tramo Samper – Reus, en un día medio (semana de 6 días), coexistirían 14 trenes de viajeros y 42 de mercancías (datos de CIRTRA, 2011), resultando en el peor de las hipótesis un grado de saturación cercano al 90%. Realmente será menor, al existir intervalos de tres horas sin la circulación de ningún tren de viajeros y trenes de mercancías que son capaces de desarrollar mejores marchas que las que hemos considerado: mercante con las peores marchas entre las diferentes estaciones (datos extraídos de los Libros Horarios de Adif, considerando en cada caso, los correspondientes tiempos de frenado, parada y reanudación de la marcha que se han calculado).

Aunque el número de circulaciones en el tramo Miraflores – Samper es menor, el cantón crítico de la línea 210 (Miraflores – Tarragona), está precisamente en este tramo, por lo que sería necesario habilitar el apeadero de El Burgo de Ebro en estación, como lo era hace unos años, para dividir el cantón crítico Río Huerva – Fuentes de Ebro (26,5 minutos de marcha para el peor tren). De este modo el cantón crítico de este tramo es Río Huerva – El Burgo de Ebro que presenta una marcha de 17 minutos para el peor tren. A pesar de esta actuación aún no es suficiente, por lo que también será necesario dividir el citado cantón o dotar de doble vía al tramo Bif. Teruel – Cartuja-AG 351.1, para que no implique una pérdida de capacidad en el tramo Samper – Reus. En este trayecto la capacidad está condicionada por el cantón crítico Mora La Nova – Ascó (12 minutos) que como recordamos presentará un alto grado de saturación durante la ejecución de las obras.

5.3. Capacidad tras la implantación del ancho estándar entre Zaragoza y Tarragona

Una vez que exista la posibilidad de circulación de trenes de mercancías en ancho 1435mm desde Zaragoza a Tarragona / Port de Barcelona / Frontera Francesa, supondrá un descenso de circulaciones en el tramo Miraflores – Reus de la línea 210. Un tráfico de seis mercantes por sentido en ancho 1435mm (de los que antes operaban en 1668mm), supondría que el grado de saturación del tramo Miraflores – Reus descendiera por debajo del 70% (grado de saturación que descenderá a medida que se programen más mercantes en 1435mm de los que antes operaban en 1668mm). El resto de tramos presentarían grados de saturación inferiores.

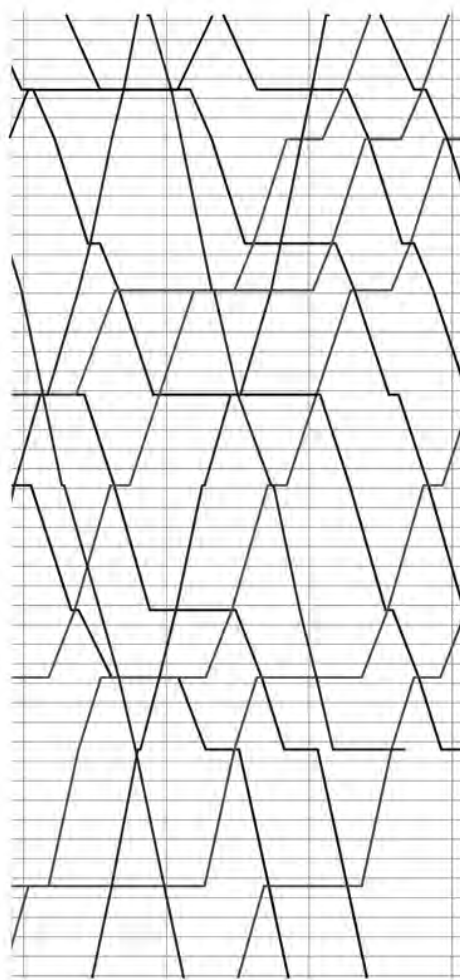


Fig. 3. Simulación realizada para el peor intervalo de 3 horas

Se ha propuesto adaptar las estaciones de Zaragoza Corbera Alta, Almudevar, Marcén-Poliñino, Selgua, Tamarite, Puigverd de Lleida-Artesa, Canal D'Urgell y Vilaverd para permitir el estacionamiento de trenes de 750m, ya que son las que presentan disponibilidad de suelo. El cantón crítico entre Grisén / Zaragoza Plaza y Tarragona, para trenes de 750m, será Tamarite – Puigverd de Lleida-Artesa, invirtiendo los trenes 42 minutos. Por lo que considerando los tiempos de frenado, reanudación de la marcha y de parada por cruce, además de reservar tres horas para la banda de mantenimiento, se obtiene una capacidad diaria de unos 25 trenes mercantes de 750m que operen en 1435mm, siendo ésta más que suficiente a día de hoy.

6. Opción B: Zaragoza – Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus – Tarragona. Tramo Tardienta – Lleida – Tarragona en ancho 1668 / 1435 mm

6.1. Descripción

Esta alternativa supone la implantación del ancho mixto (1668 / 1435 mm) en los tramos de vía única Tardienta – Lleida, Lleida – La Plana de Picamoixons, La Plana de Picamoixons – Reus y en ambas vías del tramo de vía doble Reus – Tarragona. Esta propuesta supone mantener el sentido preferente de circulación en los tramos Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus y Miraflores – Reus para los trenes de mercancías en ancho 1668mm, permitiendo además la circulación de un determinado número de trenes en ancho 1435mm. A medida que aumenten las circulaciones en ancho 1435mm y como estado último, ambos tramos se comportarán como vías únicas con circulaciones en ambos sentidos (dando fin al sentido preferente de circulación actual); el tramo Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus para trenes de 1435 mm y en el tramo Miraflores – Reus para 1668 mm.

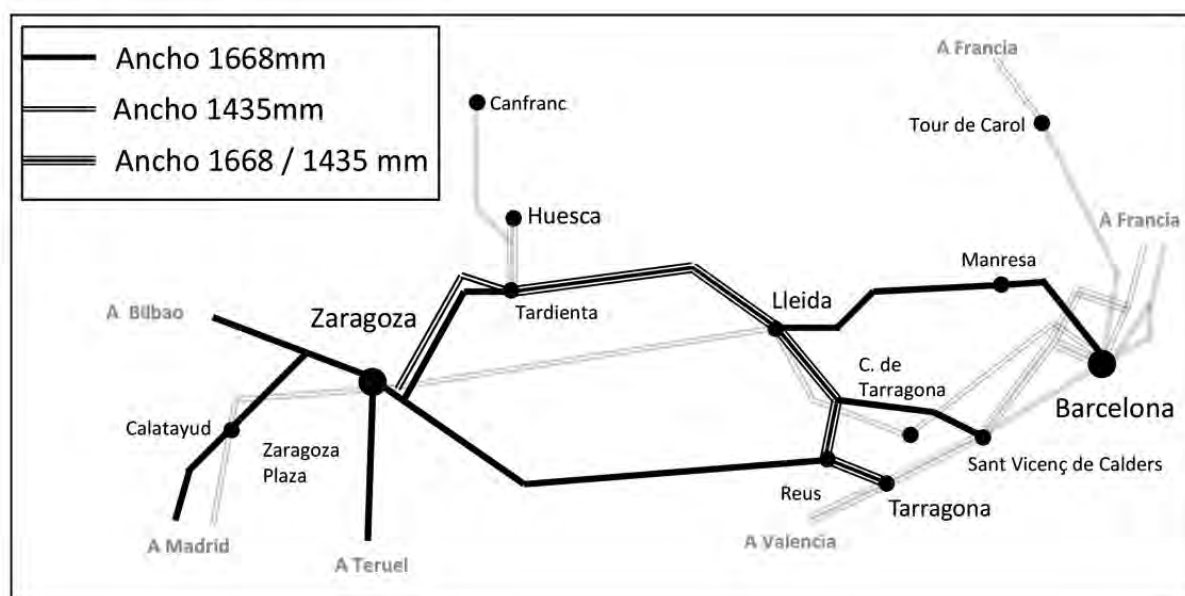


Fig. 4. Esquema de la opción B. Fuente: elaboración propia

Esta alternativa también propone adaptar las estaciones descritas en la alternativa anterior para permitir el estacionamiento de 750m de tren en ancho 1435mm. Las estaciones que se consideran son aquellas que presentan disponibilidad de suelo.

6.2. Estudio de la capacidad

La capacidad mínima se producirá cuando la instalación actúe como vía única para el ancho 1435mm ya que el cantón crítico es mayor. El cantón crítico entre Grisén / Zaragoza Plaza y Tarragona, para trenes de 750m, será al igual que en la alternativa descrita anteriormente, Tamarite – Puigverd de Lleida-Artesa, invirtiendo los trenes 42 minutos. Por lo que supone una capacidad diaria de unos 25 trenes de 750m en ancho 1435mm.

La capacidad máxima será superior que cuando actúe la instalación como vía única para ancho 1668mm con mismas circulaciones por sentido, ya que se puede establecer un sentido preferente de circulación, en coordinación con la línea 210 (Miraflores – Tarragona). La capacidad para vía única con mismas circulaciones por sentido, vendría motivada por el cantón crítico Raimat – Lleida-Pirineus (el peor tren tardaría en recorrerlo 17 minutos). Para este supuesto, considerando los tiempos de frenado, reanudación de la marcha, parada por cruce y reservando una franja horaria para los trabajos de mantenimiento; la capacidad rondaría los 60 trenes/día. Al explotarse en condiciones de sentido preferente, sería algo superior, coincidiendo con la capacidad actual (alrededor de 80 trenes/día).

Por tanto, la capacidad oscilará entre las dos situaciones extremas comentadas, disminuyendo por consiguiente la capacidad a medida que se incrementen las circulaciones de trenes de 750m en ancho 1435mm.

7. Opción C: Zaragoza – Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus – Tarragona y Zaragoza – Samper – Reus – Tarragona

7.1. Descripción

Implantación del ancho mixto en los tramos de vía única Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus y Miraflores – Reus, al igual que en ambas vías del tramo de vía doble Reus – Tarragona. Se considera también la adaptación de estaciones a ancho estándar para trenes de 750m. Esta alternativa frente a la Opción B, permite mantener el sentido preferente de circulación actual, independientemente del aumento de circulaciones de trenes de mercancías en ancho 1435mm.

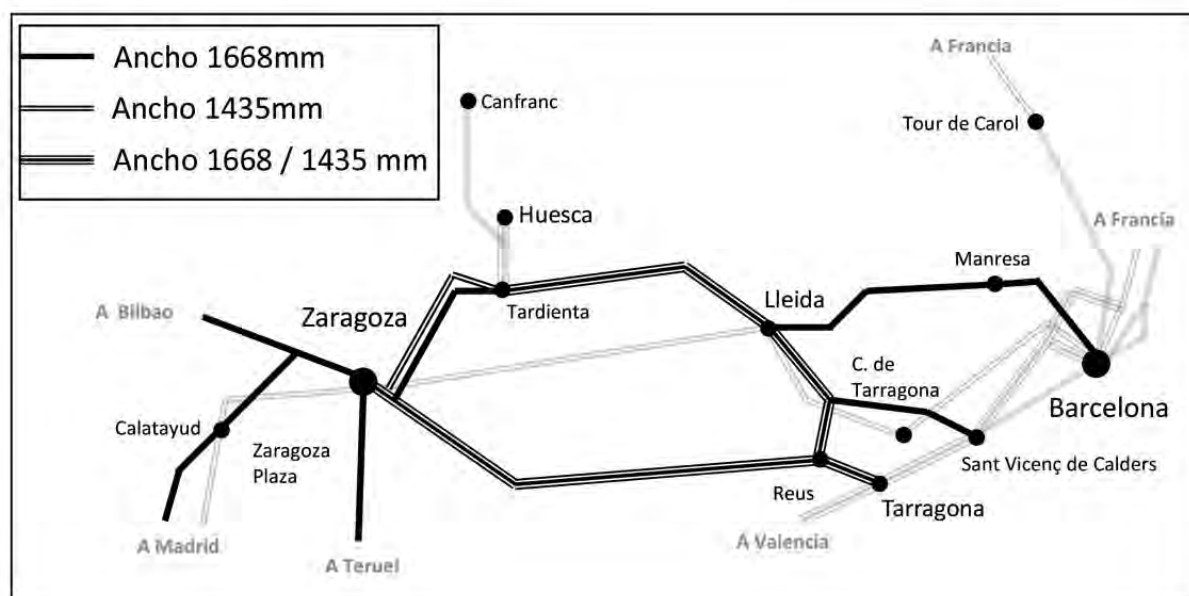


Fig. 5. Esquema de la opción C. Fuente: elaboración propia

7.2. Estudio capacidad

Supone mantener una capacidad similar a la actual, aunque algo inferior por los condicionantes de la vía mixta. Como se ha visto, el grado de saturación actual permite absorber nuevos tráficos.

8. Elección de Alternativa

En este apartado se pretende comparar unas alternativas frente a otras que justifiquen la elección de una de ellas. La opción A es la alternativa que supone una menor inversión frente a las opciones B y C, seguramente sería la elegida por el administrador de infraestructuras ya que minimiza su coste. Sin embargo, no hay que olvidar que esta alternativa incurre en un incremento de los tiempos de viaje y en un aumento de coste para los operadores (mayor necesidad de personal, mayor inmovilizado de material rodante y mayores costes energéticos), ya que supone un cambio de explotación, pasando de un sentido preferente de circulación en vía única a una explotación con cruces permanentes. Estas cuestiones pueden suponer un descenso del número de mercancías domésticas que se mueven por ferrocarril, optando por la carretera. La opción C es la alternativa que minimiza estos costes y tiempos independientemente del incremento de circulaciones de mercantes de ancho 1435mm.

Con los datos del *Observatorio del Transporte por Ferrocarril en España*, se ha calculado el porcentaje que suponen los costes de amortización / leasing y financiación del material rodante más el personal en el coste total de explotación según el tipo de mercancía que se transporta (medido en c€ / Tneta.km). Se observa una gran dependencia, que oscila entre el 28% y el 49%, siendo siempre superior en las líneas de perfil montañoso (menor velocidad media), que se asemejaría a la opción A en una estimación a grosso modo frente a la opción C, que representaría una línea con perfil suave (mayor velocidad media). Si además se añade el consumo de energía, estos conceptos suponen entre el 46% y el 68% del coste de explotación en función del tipo de mercancía que transporta, siendo siempre varios puntos superior para las líneas de perfil montañoso (marcha menos uniforme). Se ha realizado una simulación, con tráfico exclusivo de mercancías, en el tramo Reus – Nonaspe (99,6 km), perteneciente a la línea 210 (Miraflores – Tarragona). Tras el cálculo, supone un incremento de tiempo del 54% respecto a considerar la opción A (Figura 6), que se estima en 160 minutos para el peor tren y la opción C, que resulta 104 minutos para el mismo tren y trayecto. En definitiva, para una correcta elección será necesario calcular como afecta a la elasticidad de la demanda el incremento de tiempo de viaje al igual que el incremento de los costes energéticos, derivados de las continuas paradas por cruce que tienen lugar en la opción A.

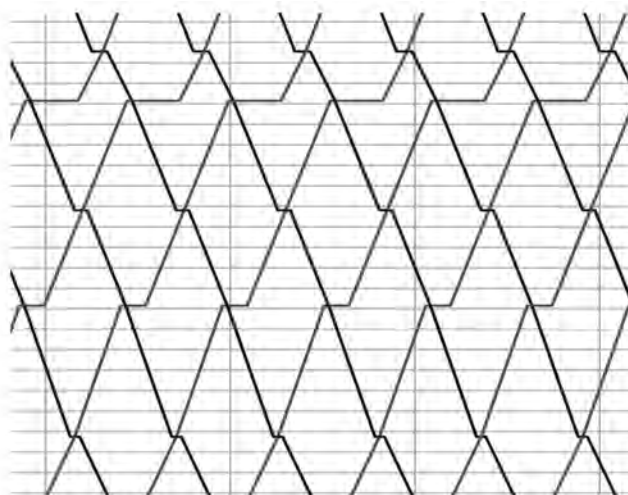


Fig. 6. Malla simulada de un tramo de la línea 210 al considerar la Opción A. Fuente: elaboración propia

La opción A también supone un peor reparto del grado de saturación ya que se produce la segregación de tráfico de origen / destino Madrid / Cordillera Cantábrica con destino / origen Cataluña en ancho 1668mm por el tramo Zaragoza – Reus y del tráfico de mercancías origen / destino Zaragoza con destino / origen Corredor Mediterráneo / Europa a través de los tramos Tardienta – Lleida – La Plana de Picamoixons – Reus. La opción C es la que supone un mejor reparto y aprovechamiento de la capacidad y por tanto, ofrece un mayor número de surcos que permiten así, adaptarse mejor a las necesidades del cliente.

Aunque todas las alternativas estudiadas presentan para la programación de trenes de mercancías en ancho estándar condicionantes tales como la necesidad de trenes bitensión ya que la línea 070 (Bif. Huesca – Huesca) está electrificada a 25KV c.a. frente a la electrificación de 3KV c.c. del resto de tramos y además, para los trenes que necesiten cruzar la frontera, será necesario que sean tritensión (en Francia 1,5KV c.c). En todas las alternativas también supone que estos trenes tendrán que estar equipados con los ATPs de las líneas por las que vayan a circular; siendo en España necesario ASFA y en TP Ferro (sección internacional) ERTMS N1 (ya que sólo cuenta con este equipamiento). Sin embargo, además de los condicionantes detallados, en la opción A es necesario operar servicios de Media Distancia residuales (Zaragoza – Monzón – Lleida) en ancho 1435mm y bitensión (25KV c.a y 3KV c.c) si son eléctricos, sin olvidar la necesidad de establecer una base para el mantenimiento de este material. Por el contrario, las opciones B y C (incorporan el ancho mixto), posibilitan la continuidad de los servicios actuales sin incurrir en nuevos costes.

Tomando en consideración estas cuestiones, en mi opinión, la solución a elegir es la opción B, ya que supone una fase anterior a la opción C, deseable a medio plazo y por tanto, permite diferir parte de la inversión en el tiempo. La opción B supone mantener el sentido preferente de circulación para los mercantes que operen en ancho 1668mm, permitiendo a su vez la programación de mercantes de 750m en ancho 1435mm. El mantenimiento del sentido preferente de circulación supone no incrementar los costes ni aumentar los tiempos de viaje actuales para los operadores como sucedía en la opción A (alternativa más ventajosa económicamente para el administrador de infraestructuras). Asimismo, la solución adoptada (Opción B) no implica modificaciones en el material rodante ni en las instalaciones para su mantenimiento. A medida que aumenten las circulaciones de trenes de mercancías en ancho estándar será necesario considerar la implantación de la opción C.

9. Conclusión

Al analizar el grado de saturación de la Red actual del ámbito de estudio, se observa que existe una capacidad potencial que permite absorber un incremento de circulaciones. Con el objetivo de extender el ancho 1435mm a Zaragoza y su entorno, permitiendo así la circulación de trenes en este ancho a Zaragoza Plaza y Grisén (General Motors). Se han considerado varias alternativas que aprovechan la infraestructura actual, todas ellas contemplan el tramo Bifurcación Huesca – Tardienta (pertenece a la línea 070) ya que el ancho de vía de este tramo es 1435mm y además, presenta unas rampas características aptas para el tráfico de mercancías, indicando también, el bajo grado de ocupación de este tramo. Se ha primado también la utilización del tramo Tardienta – Lleida-Pirineus frente al tramo Miraflores – Samper – Reus debido a que necesita una renovación total de sus instalaciones en el corto plazo, lo que redundaría en minimizar la inversión.

A la hora de elegir la mejor alternativa, se han visto enfrentados los intereses del administrador de infraestructuras y de los operadores. La opción A, que cuya diferencia principal es la migración al ancho estándar del tramo Tardienta – Lleida-Pirineus, supone acabar con el sentido preferente de circulación que existe en los tramos Tardienta – Lleida-Pirineus – La Plana de Picamoixons – Reus y Miraflores – Reus, actuando actualmente ambos tramos en vía única como si de una doble vía se tratase (salvando las diferencias). Esta opción, que resulta la de menor inversión, supone un cambio en el sistema de explotación, que implica permanentemente cruces. Esto supone un incremento de tiempos de viaje (entorno a un 50%) con el consiguiente coste, al igual que las continuas paradas necesarias para cruzarse producen un aumento de los costes energéticos. Se ha observado como los costes de amortización / leasing, financiación y costes de personal suponen una parte importante de los costes totales de explotación, dependiendo estos costes del tiempo y no de los kilómetros recorridos.

Finalmente, me he decantado por la opción B, que supone la implantación del ancho mixto en Tardienta – Lleida-Pirineus – La Plana de Picamoixons – Reus – Tarragona, lo que permite mantener inicialmente el sentido preferente de circulación, manteniendo los costes energéticos y los tiempos de viaje actuales (hasta la frontera). A medida que aumenten las circulaciones de mercantes en ancho 1435mm, será necesario estudiar la opción C, que contempla la opción B más la implantación del ancho mixto en Miraflores – Reus. De todos modos, será necesario realizar un estudio de cómo afecta a la elasticidad de la demanda el incremento de tiempos y costes energéticos de las distintas opciones, en comparación a la diferencia de inversión que supone, siendo en principio ésta no muy elevada.

En conclusión, la alternativa elegida permite acometer en el corto plazo con una inversión mínima, la extensión del ancho estándar a Zaragoza para trenes de mercancías. Supone así una reducción de costes para los trenes con origen / destino Europa, en primer lugar, por eliminar la ruptura de carga que se produce actualmente en la frontera y por otra, por permitir una mayor carga de transporte al adaptar estaciones que permitan el estacionamiento de trenes de 750m de longitud.

Referencias bibliográficas

- [1] Adif. (2012). CIRTRA 2011. Tomo I: Características de Infraestructura. Estructura y equipamiento de los tramos. Madrid: Autor.
- [2] Adif. (2012). CIRTRA 2011. Tomo II: Circulaciones y km-Tren por Tramos. Madrid: Autor.
- [3] Adif. (2012). Cuadro de Cargas Máximas. Madrid: Autor.
- [4] Adif. (2012). Cuadro de Velocidad Máximas. Madrid: Autor.
- [5] Adif. (2012). Declaración sobre la red 2011. Madrid: Autor.
- [6] Adif. (2012). Libros Horarios. Madrid: Autor.
- [7] Consejo Aragonés de Cámaras Oficiales de Comercio e Industria, Confederación de Empresarios de Aragón y Caja Inmaculada. (2010). La logística en Aragón. Zaragoza: Autor.
- [8] Consejo Económico y Social de Aragón. (2009). Posibilidades y viabilidad para la reapertura del Canfranc. Zaragoza: Autor.
- [9] Dirección General de Transporte Terrestre. (2011). Observatorio del Transporte Intermodal Terrestre y Marítimo. Madrid: Autor.
- [10] López Pita, Andrés. (2008). Explotación de líneas de ferrocarril. Barcelona: Ediciones UPC.
- [11] Ministère de l'Équipement des Transports du Logement du Tourisme et de la Mer y Ministerio de Fomento. (2008). Observatorio hispano-francés de Tráfico en los Pirineos. Madrid: Autor.
- [12] Ministerio de Fomento. (2010). Plan Estratégico Para El Impulso Del Transporte Ferroviario De Mercancías En España. Madrid: Autor.
- [13] Ministerio de Fomento y Adif. Red Arterial Ferroviaria de Zaragoza. Transformación a Ancho Internacional. Está indicado: Versión V3.11 a
- [14] Ministerio de Fomento, Adif e Ineco. (2011). Estudio del Corredor Ferroviario Mediterráneo. Madrid: Autor.
- [15] Observatorio del Ferrocarril en España. (2011). Transporte de Mercancías. Madrid: Autor.
- [16] Universidad Pontificia Comillas. (2012). Apuntes Curso 2011-2012 del Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios. Material no publicado

Sistema de Conducción Automática de Trenes (ATO), para la Línea – 4 del FC Metropolità de Barcelona

Automatic Train Operation of trains, for the Line 4 of FC Metropolità de Barcelona

Montserrat Artigas Palomeque*, Pau Picas Martínez

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (Barcelona)

Resumen

El proyecto desarrollado consiste en una mejora del sistema de protección al tren ATP instalado actualmente en la línea 4 de Metro de Barcelona. Esta optimización se conseguiría a través de la implementación del sistema ATO (Conducción Automática del Tren), el cual aumenta la eficiencia de la curva de frenado cuando se tiene que cambiar de Circuito de Vía, no generando saltos de aceleración ni de frenado. En el caso del Motorista, en conducción manual, él mismo no puede regular correctamente los cambios de velocidad al pasar de un circuito de vía a otro con los distintos códigos de velocidad. También se logra un aumento de la velocidad comercial, una mejor regulación entre trenes y estabilidad en el intervalo entre trenes en la citada L-4 de FMB (Ferrocarril Metropolità de Barcelona).

Palabras clave: ATO, Circuito de Vía, ATP, ATS, ECA (Equipo de Campo ATO), FMB, CTC, DMI.

Abstract

The Project developed consist about an improvement of the automatic train protection (ATP) currently working in the line 4 of Metro de Barcelona. This optimization will be obtained through the implementation of the ATO (Automatic Train Operation) system, which increases the efficiency of the braking curve when the train has to change of track circuit, avoiding acceleration jumps or brakes. In the case of the driver, manual conduction, he cannot regulate correctly the changes of velocity when is going to pass from a track circuit to another one with different velocity codes. In addition, it can obtain an increasing commercial velocity, a better traffic regulation of the trains and more stability of the interval between trains in the Line 4 from FMB (Ferrocarril Metropolità de Barcelona).

Keywords: ATO, Track circuit, ATP, ATS, ECA (Land Equipment ATO), CTC, FMB, DMI.

* montserrat.artigas@selca.org

1. Objetivos

Dentro del presente proyecto podemos definir dos objetivos principales, que son los siguientes:

- Conseguir con el desarrollo de este proyecto de Ato en Línea – 4 de FMBCN, aumentar la eficiencia de la curva de frenado cuando se efectúan cambios de Circuitos de vía que tengan asignadas diferentes velocidades (Ahorro de energía), así como un aumento de la velocidad comercial, mejor regulación entre trenes y estabilidad en el intervalo de estos en la citada Línea – 4 de Ferrocarril Metropolitano de Barcelona.
- Objetivos específicos: El proyecto consiste en una optimización del sistema de protección del tren ATP instalado actualmente en la Línea-4 de FMBC mediante la implantación del sistema ATO (Conducción automática del tren)

2. Solución propuesta

La solución propuesta en este proyecto con el fin de conseguir una conducción automática de los trenes en la Línea-4 de Ferrocarril Metropolitano de Barcelona mediante el sistema de ATO. La razón de la adopción de esta solución, está basada en las necesidades de explotación. Operación y coste económico. Son los siguientes:

- Confort al viajero, supresión de las aceleraciones y frenadas en conducción manual del tren
- Intervalo entre trenes mucho más estable que a través de la conducción manual
- ATS controla a las circulaciones por la línea en conducción automática
- Ahorro de energía, eliminando consumos de energía innecesarios, optimizando la curva de frenado y controlando los cambios de velocidad entre Circuitos de Vía hasta su estacionamiento en el punto de parada de la estación.

3. Introducción al sistema ATO

La necesidad de instalar un Sistema de ATO en la línea – 4 de Metro de Barcelona, viene condicionado por la necesidad de dar confort al viajero, ya que se suprimen todas las aceleraciones y frenadas que introduce el motorista cuando se conduce manualmente el tren. Con el Sistema ATO, también se consigue un intervalo entre trenes mucho más estable que a través de la conducción manual. Al ser un sistema de conducción automática del tren la intervención del motorista es mínima, lo que permite que el ATS tenga control de los trenes que circulan por la línea en conducción automática. También se consigue un ahorro de energía, pero que en este proyecto no se contempla ni su cálculo ni las condiciones que se requieren para optimizar el mencionado ahorro de energía.

Para la implementación del sistema ATO es necesaria la instalación de equipos de campo, de estación y de vía juntamente con los protocolos de comunicaciones necesarios y la instalación de toda una red de fibra óptica para la correcta ejecución de sus funciones.

3.1. La evolución del sistema ATP por códigos de velocidad al ATC (ATO + ATP)

El sistema ATP por códigos de velocidad pertenece al grupo de Información Continua – Protección Continua por lo tanto el tren está permanentemente comunicado con el enclavamiento y recibiendo la información necesaria para la seguridad en la conducción del tren, protegiéndolo contra rebases de señales con indicación de rojo, excesos de velocidad máxima en los circuitos de vía, entre otros. Este sistema protege al motorista de cometer un error como por ejemplo superar la máxima velocidad o entrar en el siguiente circuito de vía a una velocidad excesiva, en estos casos el sistema ATP actuaría con el freno de emergencia.

El sistema ATP juntamente con el ATO ayuda a que estas anomalías sean eliminadas debido a que el motorista está presente solo por medidas de seguridad (en el caso de caída de objetos o de caída de personas a la vía), para abrir puertas de andén y para arrancar el tren. Gracias a que el sistema ATO se encarga de todo lo relacionado con la conducción: sistemas de marcha del tren interestaciones (ayuda a optimizar la marcha respecto a las curvas de frenado), ayudas a la conducción, precisión en paradas en la estación, etc...

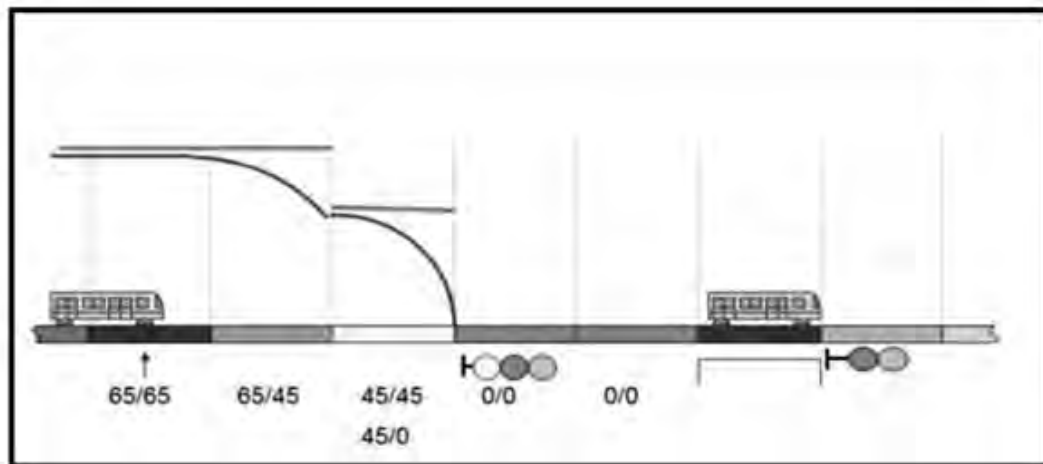


Figura 1. ATP por códigos de velocidad

En la imagen anterior se puede observar cómo debido a la ocupación de un tren del cantón entre señales, el tren que le sigue se ve obligado a detenerse delante de la señal que protege el circuito de vía del cantón ocupado. La información que recibe el tren del cantón ocupado, por delante de él, en el mismo sentido de marcha por otro tren, le permite el cálculo de la curva de frenado para poder detenerse delante de la señal con indicación de rojo y que protege el cantón ocupado por el tren que circula por delante del mismo. En conducción manual, el motorista al empezar la curva de frenado calculada por el tren, se le indicará en el DMI (Interface Hombre Maquina) si va por encima de la velocidad permitida y a qué velocidad debe ir para respetar la velocidad en la curva de frenado calculada por el tren a través del sistema de ATP hasta pararse delante de la señal con indicación de rojo.

Con la implantación del sistema ATO, la regulación de la velocidad en el frenado del tren se efectúa automáticamente sin necesidad que intervenga el motorista, hasta situarse en el punto de parada delante de la señal en rojo.

El sistema ATO genera una serie de marchas en el tren que le permite regular su consumo en función de las mismas. Una de las marchas del tren es circular en deriva, con esta consigna de marcha el tren no consume energía ya que circula por su propia inercia. Con esta consigna de marcha, puede darse el caso que el tren no tenga suficiente potencia como para llegar al siguiente circuito de vía lo que provoca que se tenga que volver aplicar tracción provocando un consumo de energía innecesario.

Con el sistema ATO este consumo se elimina, automatizando la curva de frenado y controlando los cambios de velocidad para que el tren llegue con la velocidad adecuada al pie de la señal con indicación en rojo.

3.2. Descripción general de la funcionalidad del sistema de conducción automática ATO

El sistema ATO estará basado en una comunicación mediante lazos inductivos y el equipo de a bordo del tren. El equipo de campo principal serán los lazos inductivos situados en la entrada y salida de las estaciones

que permitirán transmitir información a los trenes. Dicha información se compone de una parte fija (códigos de: Línea, estación y vía), y de una parte variable que básicamente contiene:

- Programas de regulación de marcha (velocidad de regulación y en deriva, velocidad para que el tren vuelva a aplicar tracción y parábola de frenado)
- Indicación del lado de apertura de puertas
- Selección del punto de parada en estación
- Permiso de vuelta automática
- Petición de salto de estación

Habrà que tener en cuenta que la indicación del lado de apertura de puertas es un dato fijo, pero que se podrá contemplar como un dato variable en determinadas ocasiones cuando el operador así lo desee.

3.3. Funciones principales del Sistema ATO de vía

El sistema de ATO de vía realizará las siguientes funciones:

Corrección de los errores acumulados en la interestación en cuanto a medida de distancia por el equipo de ATO instalado en el tren. Esto se conseguirá mediante la información fija (actualización del punto kilométrico) que entrega la parte del lazo que se encarga de esta información y se compara con la información odométrica que tiene el tren a través de las medidas ejecutadas por los odómetros situados a bordo del tren.

Corrección del diámetro de rueda. Igualmente, el equipo calculará y corregirá el valor almacenado de diámetro de rueda, midiendo el tiempo que tarda el tren en recorrer la distancia entre lazos inductivos.

Auto localización del tren. Mediante la transmisión de una serie de datos fijos a través de los lazos inductivos, el equipo de tren se localizará en cuanto recibe la información del primer lazo.

Centro de Control del ATO en el ATS (CCM). El sistema de ATO está compuesto de sendos servidores que son los que gestionan el sistema de ATO conjuntamente con el sistema de regulación. Puesto que, además de los datos fijos, los lazos inductivos transmitirán datos variables enviados por el ATS, éste puede intervenir sobre la marcha de los trenes (cambio de marcha, permiso o no de vuelta automática, etc.)

3.4. Funciones principales del equipo de campo

Se tratarán de elementos pasivos y son los siguientes:

- Unidad de Alimentación de lazos inductivos (UAL)
- Lazos inductivos ATO

3.4.1. Funciones principales de la Unidad de Alimentación de Lazo.

- Adaptará las impedancias entre el equipo de vía y el lazo inductivo de ATO.
- Servirá de elemento de ajuste, mediante atenuadores, para conseguir que circule por el lazo la intensidad requerida.
- Se instalan, en general, dos UAL por cada estación y vía.

3.4.2. Funciones principales de los lazos de ATO.

- Construcción asimétrica: Entrada – Salida de la estación
- Sirven de referencia kilométrica al tren
 - . Corrección de errores de distancia
 - . Cálculo de diámetro de rueda
- Transmitir la información al tren:
 - . Localización al tren
 - . Realización del control de la marcha del tren

3.5. Funciones principales del Equipo de Campo ATO (ECA)

- Recibir la información, destinada a la estación que controla, que viene desde el ATS (CCM) a través de un cable de comunicación dedicado (cable de fibra óptica).
- Enviar la información fija y variable al lazo inductivo situado en la vía.

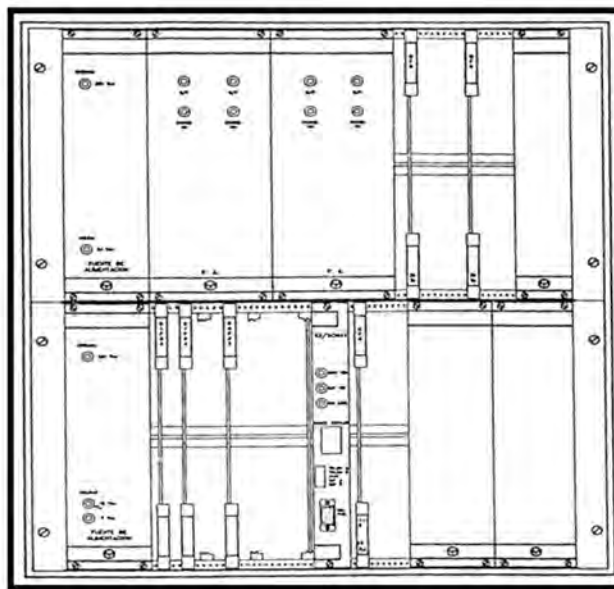


Figura 2. Equipo de Campo ATO (ECA)

3.6. ATO embarcado

El equipo de ATO embarcado constará de lo siguientes equipos:

- Unidad de ATO
- Antenas de ATO
- Conjunto de relés de ATO
- Panel de conducción
- Cableado correspondiente para la interconexión de estos elementos y la conexión con el resto de sistemas de tren (en particular con el sistema de tracción y freno de tren).

3.6.1. Unidad de ATO

Esta unidad está constituida por unidades Fail-Safe que constituyen el equipo principal del sistema de ATO de tren y es en ella donde se toman las decisiones para la aplicación de freno o tracción y el grado correspondiente. Además de cumplir con los requerimientos propios de la conducción automática proporciona al motorista la información necesaria del tren.

Dispone de chequeos internos que le permiten detectar fallos debidos a causas internas, así como fallos motivados por causas ajenas al ATO (fallos en el freno del tren, etc.). De esta forma se minimiza el tiempo de detección y reparación de averías.

Para la toma de decisiones, esta unidad utiliza la información procedente del exterior que le llega a través de un interface de entrada.

Estas informaciones son:

- Velocidad real del tren procedente de la Unidad No Vital del equipo de ATP embarcado
- Modo ATO seleccionado, procedente de la Unidad no vital equipo ATP
- Orden de arranque procedente del pupitre de conducción (pulsadores).
- Velocidad objetivo transmitida por el equipo de ATP de vía a la Unidad no vital y enviada por esta a la unidad de ATO.
- Señal de ATO (modulada en FSK) transmitida a través de los lazos inductivos situados en las estaciones. Esta señal es captada por las antenas de ATO.

La unidad de ATO procesa estos datos y obtiene como resultado las órdenes de tracción y freno necesarias en cada instante para la marcha del tren, así como una serie de indicaciones para el motorista y para el resto de los equipos de tren.

ATS (CCM)

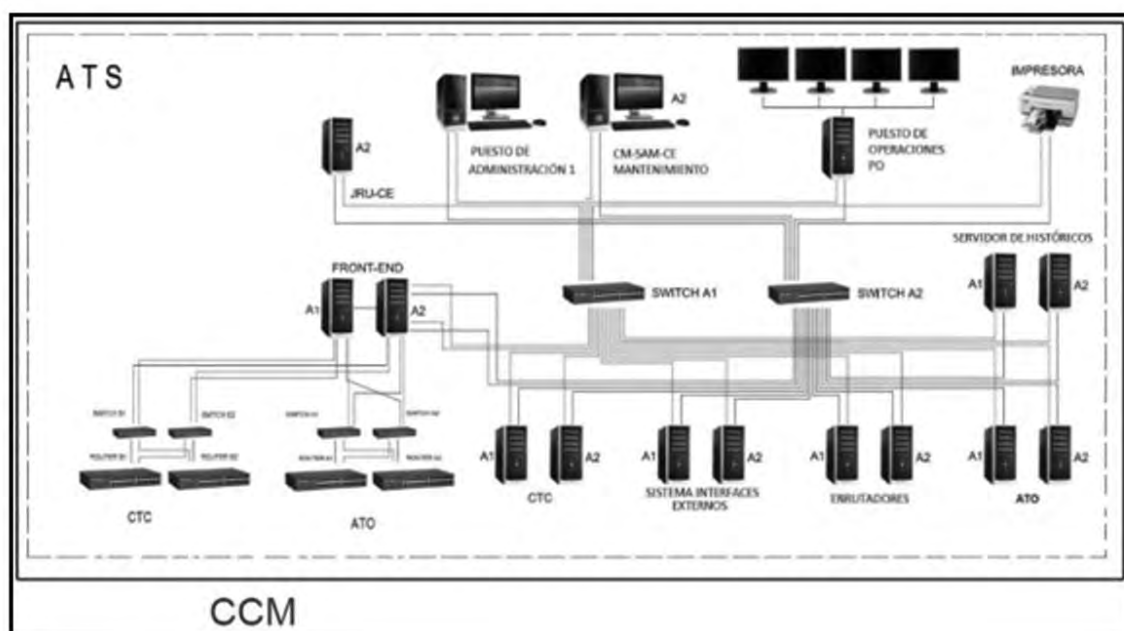


Figura 3. Equipo ATO en el ATS (CCM)

Este conjunto de Sistemas permiten efectuar el seguimiento del tren, ejecutar el enrutamiento del tren a través de los itinerarios permitidos por los ENCE's, modos de conducción (ATO) y sistemas de marcha con velocidades por debajo del ATP, para optimizar el tiempo de recorrido.

Sistema ATO

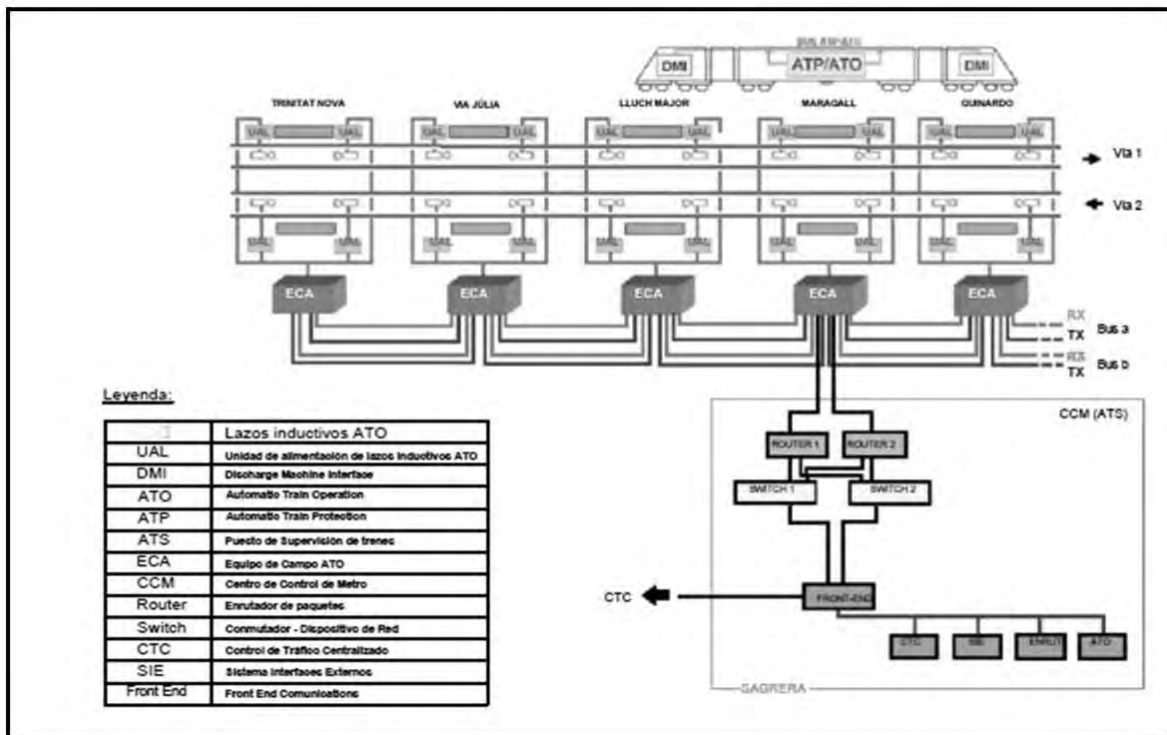


Figura 4. Esquema del sistema ATO

Entre el ATS (CCM) y el equipo de ATO alojado en cada estación se establece una comunicación mediante una red de área local (LAN) propia. El equipo de ATO dentro del ATS envía los datos necesarios para la conducción automática de la línea mediante esta red propia de comunicaciones por lo que no interfiere en el sistema de protección al tren ATP. Estos datos son leídos por el tren en cuanto pasa por encima de un lazo inductivo de ATO, que le indica (dependiendo si es un mensaje fijo o variable) lado de puertas, vía, estación, etc.

6. Red de Comunicaciones ATO en L-4 Metro de Barcelona

Para poder comunicar el ATO (ATS) con el sistema de ATO en cada estación de la línea 4 de Metro de Barcelona se ha propuesto usar dos buses de fibra óptica los cuales permiten que los mensajes transmitidos por el ATS se puedan distribuir a través de toda la línea 4, aparte dará redundancia en caso de que algún tramo falle la transmisión de estos datos a los lazos inductivos de ATO.

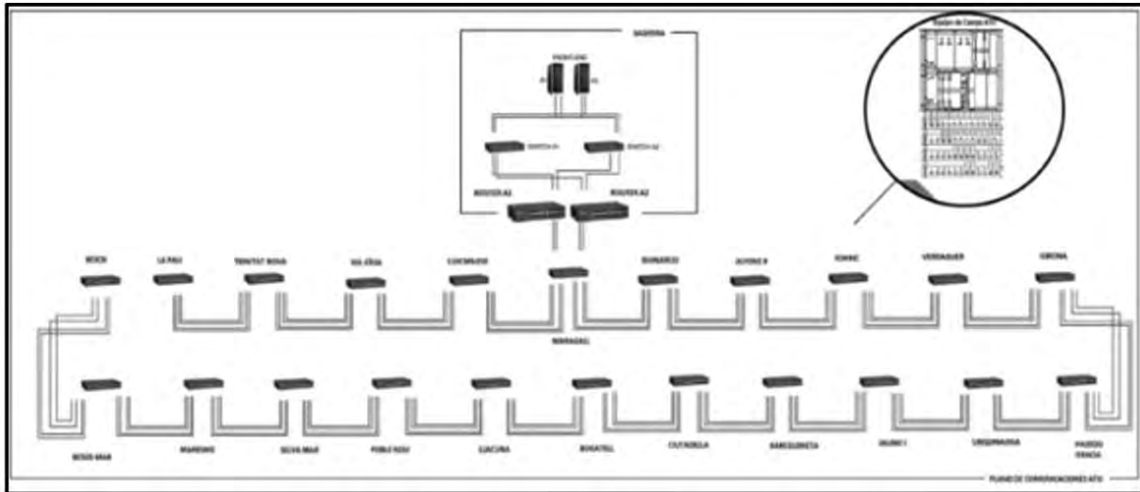


Figura 5. Red de comunicaciones ATO

En la imagen se observa el bus de fibra óptica como recorre cada sala de comunicaciones en cada estación proporcionando así capacidad para transmitir los datos necesarios para la conducción automática del tren.

7. Mediciones

- Equipos de ATO de campo por estación:

- . Equipo de Campo ATO (ECA): 1 unidades por estación (22 en total)
- . Repartidor de Fibra Óptica: 4 unidades por estación (88 en total)
- . Remota de ATO: 1 unidad por estación (22 en total)

- Equipo de vía ATO:

- . Unidades de Alimentación de Lazo: 4 unidades por estación (88 en total)
- . Lazo inductivo de ATO: 4 unidades por estación (88 en total)

Equipo en CCM:

- . Router: 2 unidades
- . Switch: 2 unidades
- . Cable telefónico de 4 pares de Cu (200 metros)

- Longitud total de cable de F.O necesario en L-4: 18012 metros (16375 + 10%)

Cable de fibra óptica monomodo de 12 fibras con cubierta tipo LSFRZH (LowSmoke, FireRetardant and Zero Halogen)

Fibra óptica	Servicio asignado	Descripción	Estado servicio	Salida
1	Red ATO	ATO entre estaciones	Activo	ATO
2	Red ATO	ATO entre estaciones	Activo	ATO
3	Red ATO	ATO entre estaciones	Activo	ATO
4	Red ATO	ATO entre estaciones	Activo	ATO
5	Reserva		-	-
6	Reserva		-	-
7	Reserva		-	-
8	Reserva		-	-
9	Reserva		-	-
10	Reserva		-	-
11	Reserva		-	-
12	Reserva		-	-

Tabla 1. Tabla de asignaciones de Fibra Óptica

8. Presupuesto

Descripción	Precio en €
ATO	1.219.827,69
Equipo ATO en CCM	142.174,78
Cables	12.176,48
Cable de Fibra óptica	11.403,00
Comunicaciones	15.391,00
RAMS	186.511,08
TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL	1.400.972,95
Gastos Generales	84.058,38
Beneficio Industrial	182.126,48
TOTAL PRESUPUESTO BASE LICITACIÓN	1.667.157,81
21% IVA	350.103,14
TOTAL PRESUPUESTO	2.017.260,95

Tabla 2. Presupuesto para la Implantación del sistema ATO

9. Conclusiones

El resultado de este proyecto nos ha permitido confirmar los objetivos expresados anteriormente: mayor confort al viajero, supresión de las aceleraciones y frenadas en conducción manual del tren, un intervalo entre trenes mucho más estable que a través de la conducción manual, el ATS controla a las circulaciones por la línea en conducción automática, un ahorro de energía, pero en este proyecto no se contempla ni su cálculo ni las condiciones que se requieren para optimizar dicho ahorro. Por todo lo anteriormente mencionado, la implantación del sistema ATO será beneficioso para Ferrocarril Metropolità de Barcelona.

10. Bibliografía

- [1] Apuntes de Sistemas de Protección del Tren. Tema 1 (ATP). Profesores Enric Domínguez y Carlos Catalán
- [2] Apuntes de Sistemas de Protección del Tren. Tema 2 (ATP). Profesores Enric Domínguez y Carlos Catalán
- [3] Apuntes de Sistemas de Protección del Tren. Tema 3 (ATO). Profesores Enric Domínguez y Carlos Catalán
- [4] ATO 2000 Dimetronic (Juan Carlos Antón)
- [5] Información Ferrocarril Metropolitana de Barcelona (Carlos Catalán)

Sistema Bayesiano de Localización de Trenes Basado en Medidas GNSS y Sensores Inerciales

Bayesian Railway Localization System Based on Raw GNSS Measurements and Inertial Sensors

Omar García Crespillo*

Instituto de Comunicación y Navegación, Centro Aeroespacial Alemán (DLR)
Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad de Málaga

Resumen

Los sistemas actuales de localización de trenes están basados en equipos instalados tanto en el tren como a lo largo de las vías ferroviarias, y por lo tanto suponen un alto coste en instalación y mantenimiento proporcionando sólo un posicionamiento discreto en la red de vías. Los Sistemas Globales de Posicionamiento por Satélite (GNSS), pueden proporcionar una localización global a un coste mucho más reducido, ya que sólo necesita de una antena y un receptor a bordo. Sin embargo, debido a entornos con poca visibilidad, las señales GNSS pueden estar bloqueadas y el uso de información adicional sobre el mapa de las vías y sensores adicionales, como sensores inerciales, es necesario. En este artículo se propone un sistema probabilístico de localización de trenes basado en GNSS y sensores inerciales, capaz de proporcionar un posicionamiento incluso en situaciones de baja visibilidad de satélites.

Palabras clave: Localización Ferroviaria, Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), Unidad de Medida Inercial (IMU), Estimación Bayesiana, Filtro de Partículas.

Abstract

Current railway localization systems rely on both track side and train side sensors, providing only a discrete positioning of the trains at a high cost in deployment and maintenance. On the other hand, Global Navigation Satellite Systems (GNSS) can provide a world-wide positioning at a lower cost since it requires only an antenna and a receiver on board. However, due to disadvantageous environments, the GNSS signals may get blocked and the use of additional sensor and information of the railway map is necessary to achieve a robust positioning. In this article, we propose a probabilistic localization system for trains using raw measurements from GNSS, inertial sensors and a digital railway map. The combination of these sensors in our algorithm can achieve a robust localization even in low visibility situations.

Keywords: Railway localization, Global Navigation Satellite System (GNSS), Inertial Measurement Unit (IMU), Bayesian estimation, particle filter.

* Omar.GarciaCrespillo@dlr.de

1. Introducción

Hoy en día se producen de media un accidente de tren cada dos días en la Unión Europea¹, dejando más de dos mil fallecimientos o personas gravemente heridas cada año². En la mayoría de estos accidentes están involucradas las limitaciones de los sistemas actuales de localización y navegación de los trenes ya que sólo pueden ofrecer un posicionamiento en ciertos puntos discretos de la red. Esta información no es suficiente por tanto, para ajustar el control del tren en curvas o detectar una posible colisión en cualquier punto de la red ferroviaria.

Además, estos sistemas se basan principalmente en balizas montadas en tierra que requieren de un alto coste en instalación y mantenimiento, y que se comunican a través de lazos inductivos o magnéticos con el tren.

Por este motivo, los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) —de los cuales el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es el más conocido [1]— se han presentado como una opción que puede ofrecer un posicionamiento continuo a un coste mucho más reducido, ya que no necesita de infraestructura previa en tierra. En particular, con la llegada del nuevo sistema Europeo Galileo, se podrá ofrecer servicios para ciertas aplicaciones que requieran mayor grado de integridad y robustez, los llamados “Safety-of-Life systems”.

Sin embargo, la precisión que pueden garantizar como único sistema no es suficiente para distinguir entre dos posibles vías paralelas (Figura 1) y, por tanto, tampoco pueden garantizar la posición del tren después de una bifurcación. Por este motivo, se ha sugerido en la literatura el uso de otros tipos de sensores instalados también a bordo como complemento a GNSS. Uno de los más utilizados tradicionalmente han sido los sensores inerciales, de hecho la información que puede proporcionar sus giróscopos cuando el tren gira en una bifurcación, puede ser utilizada en combinación con el vector velocidad estimado con GNSS para detectar el camino tomado tras una bifurcación. Además, el uso complementario de un mapa digital de las vías puede mejorar la precisión y permitir una localización directamente en el dominio topológico de la red.

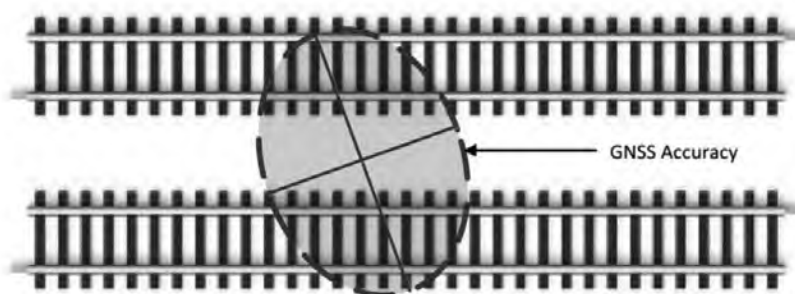


Fig. 1 La precisión que GNSS puede garantizar no es suficiente para diferenciar entre dos vías en situación de vías paralelas o tras cruzar una bifurcación

Este artículo, presenta en primer lugar el concepto general de localización de trenes mediante GNSS y sensores inerciales, así como introduce brevemente las principales características de ambos sensores. A continuación se presenta el diseño probabilístico teórico utilizado y se explica el algoritmo implementado (filtro de partículas) para la estimación de la posición topológica del tren. Después, el contexto en el que se obtuvieron las medidas utilizadas para validar el método es mencionado. Finalmente, los resultados obtenidos son analizados para distintas situaciones y geometrías de los satélites y las conclusiones son presentadas.

¹ Fuente: European Railway Agency [10]

² Fuente: Eurostat (rail_ac_catvict) [9]

2. Localización de trenes multi-sensor

En este artículo se propone un sistema de localización para trenes que hace uso de una antena GNSS colocada en el techo del vehículo, un receptor para procesar las señales GNSS, una Unidad de Medida Inercial (IMU) colocada cerca del eje de las ruedas e información sobre el mapa digital de las vías ferroviarias.

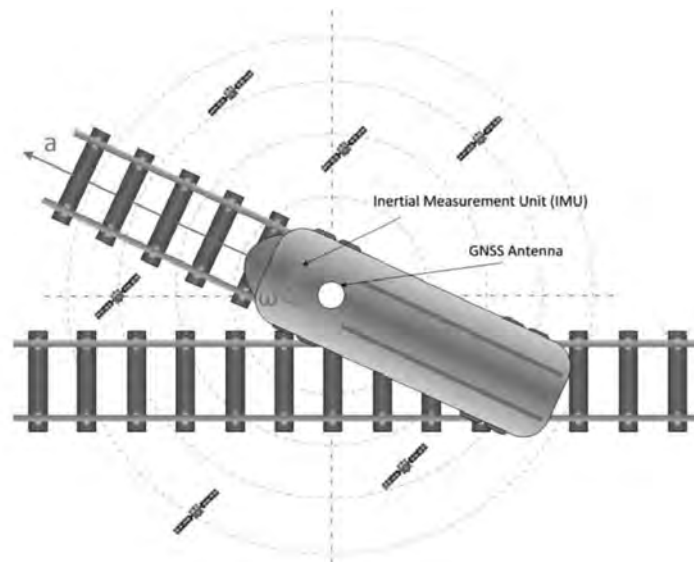


Fig. 2 Sistema de localización de trenes mediante GNSS, sensor inercial y mapa digital de las vías

A continuación se presentan los sistemas utilizados para obtener medidas.

2.1. Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)

Los sistemas GNSS, de entre los cuales el Sistema Global de Posicionamiento (GPS) es el más conocido actualmente, son capaces de calcular una posición mediante señales radio recibidas de varios satélites. En general, un receptor GNSS es capaz de calcular el tiempo que ha necesitado una señal para viajar desde el satélite hasta el usuario, y multiplicando por la velocidad de la luz se puede conocer por tanto la distancia a la que está el satélite, esta medida obtenida se conoce como pseudorange [2]. Ya que la posición de los satélites se puede calcular mediante las efemérides transmitidas en la señal, el usuario es capaz de calcular su posición usando la distancia a varios satélites mediante trilateración. Se necesitan al menos 4 satélites para calcular la posición ya que las incógnitas son la posición en tres dimensiones del usuario y la desincronización del reloj del receptor con el reloj del satélite [1].

Además, los receptores GNSS son capaces de medir la frecuencia Doppler de la señal recibida. Esta medida proporciona información sobre la velocidad relativa receptor-satélite y por lo tanto se puede utilizar para calcular la velocidad del usuario [3].

Aunque este sistema es capaz de proporcionar buena precisión en la posición, esta precisión puede no ser suficiente para diferenciar entre dos vías paralelas, ya que la distancia entre ellas es inferior a la que en general se puede garantizar con GNSS. Además, esta precisión depende altamente del número de satélites visibles, llegando a no poder calcular ninguna posición con menos de cuatro. De modo que en entornos hostiles como zonas urbanas o bosques, las limitaciones de este sistema funcionando como sistema único son evidentes.

2.2. Unidad de Medida Inercial (IMU)

Los sensores inerciales o Unidades de Medida Inercial (IMU), contienen en general sensores que registran en 3 direcciones ortogonales las aceleraciones a las que está sometido el sensor y las tasas de giro que este experimenta [4]. Por lo tanto las medidas que proporciona son medidas relativas al movimiento del vehículo al que está sujeto el sensor. Si se conoce una posición de referencia, mediante integración de las tasas de giro y aceleraciones es posible calcular la velocidad, posición y orientación a lo largo del tiempo. Sin embargo, los errores que las aceleraciones y tasas de giro presentan, se acumulan a lo largo del tiempo y no es un sistema de navegación estable por sí mismo para tiempos de operación largos.

Por el contrario, el sensor sólo depende de la dinámica del vehículo y por lo tanto funciona de igual modo en exteriores o interiores. Para nuestro objetivo, las aceleraciones nos darán información del desplazamiento del tren a lo largo de la vía, y los giróscopos nos proporcionarán información muy importante para detectar giros en las bifurcaciones entre vías y por tanto estimar correctamente la vía en la que nos encontramos.

3. Filtro Bayesiano para navegación

Como se ha explicado anteriormente, cada sensor utilizado presenta una serie de ventajas e inconvenientes. Es por esto por lo que la integración de las distintas medidas en un único algoritmo es fundamental para obtener un sistema que complemente las deficiencias que tienen por separado. Sin embargo, debido a la distinta naturaleza de las medidas, el diseño de este algoritmo es el problema más complejo. A continuación se estudia a un nivel teórico como las distintas variables se relacionan entre sí.

3.1. Red dinámica bayesiana

En este trabajo, en primer lugar, modelamos el problema de la integración de las medidas GNSS, las medidas inerciales y el mapa de las vías mediante un red bayesiana dinámica (Fig. 3). Una red dinámica bayesiana es una herramienta conceptual gráfica que nos permite representar las distintas variables que intervienen en nuestro sistema, y más importante, permite mostrar mediante flechas las dependencias casuales entre ellas y su evolución temporal [5]. En la Fig. 3 podemos ver la red bayesiana dinámica diseñada para este trabajo. En ella podemos distinguir los estados de movimiento del tren a estimar (**D**), que es el desplazamiento unidimensional a lo largo de la vía, la velocidad y la aceleración; los estados de posición del tren en la vía (**T**), que es la posición topológica y geográfica; como utilizamos las medidas en bruto GNSS, necesitamos conocer también la desincronización del reloj del receptor con el tiempo del sistema GPS, esto son los estados bias y drift en **C**; a continuación las variables observables de nuestro sistema son las medidas provenientes del sensor inercial (Z^{IMU}), los pseudorangos (Z^{PR}) y las medidas Doppler (Z^{DO}); finalmente el entorno del mapa está representado como **M**.

3.2. Filtro de Partículas

Nuestro objetivo es estimar la posición topológica del tren (**T**), para esto será también necesario estimar el movimiento del tren (**D**) y la desincronización del reloj del receptor GNSS (**C**). Esta estimación puede representarse de manera probabilística haciendo inferencia de la red bayesiana dinámica, y representándose como la siguiente distribución multidimensional [6]:

$$p(\{D, T, C\}_{0:k} | \{Z^{IMU}, Z^{PR}, Z^{DO}\}_{1:k}, M) \quad (1)$$

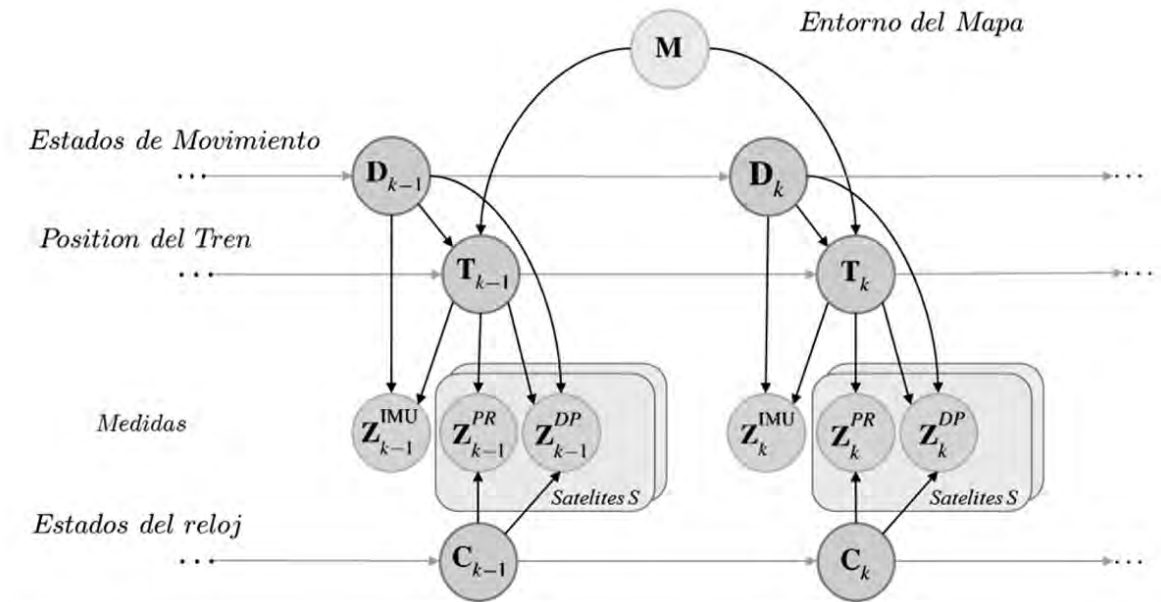


Fig.3. Red bayesiana dinámica

Existen diversos filtros bayesianos para implementar y estimar esta distribución. Los más conocidos son los filtros de Kalman [7], utilizados para estimar recursivamente por ejemplo la posición de un usuario usando medidas ruidosas. Sin embargo, debido a las no linealidades que presentan los sensores inerciales y principalmente al carácter altamente no lineal y discreto del mapa en las bifurcaciones, los filtros de Kalman no pueden usarse y es por eso que en este trabajo se decide utilizar un filtro de partículas [8]. Los filtros de partículas aproximan la distribución de la Ecuación (1) por un número determinado de hipótesis (partículas) que son propagadas haciendo simulaciones de Monte Carlo. Cada partícula es por tanto una realización de cada uno de los estados o variables que queremos estimar.

El filtro de partículas estima de manera recursiva, sometiendo a cada partícula a las siguientes dos fases:

- 1. Predicción:** En esta fase cada partícula es propagada usando los modelos de transición para cada estado. Por ejemplo, en términos de posición a lo largo de la vía, la partícula es desplazada usando un modelo rectilíneo uniformemente acelerado.
- 2. Actualización:** En esta fase, a cada partícula se le asigna un peso en función de las medidas recibidas. Por ejemplo, las partículas que estén más cerca de la posición GNSS recibirán un peso mayor.

Cuando existe mucha diferencia entre los pesos de las partículas, las partículas con pesos menores son descartadas y las de mayor peso son clonadas. En la Fig. 4 se presenta un esquema donde se puede ver un ejemplo del funcionamiento.

La solución final del filtro consiste en una media ponderada de todas las partículas.

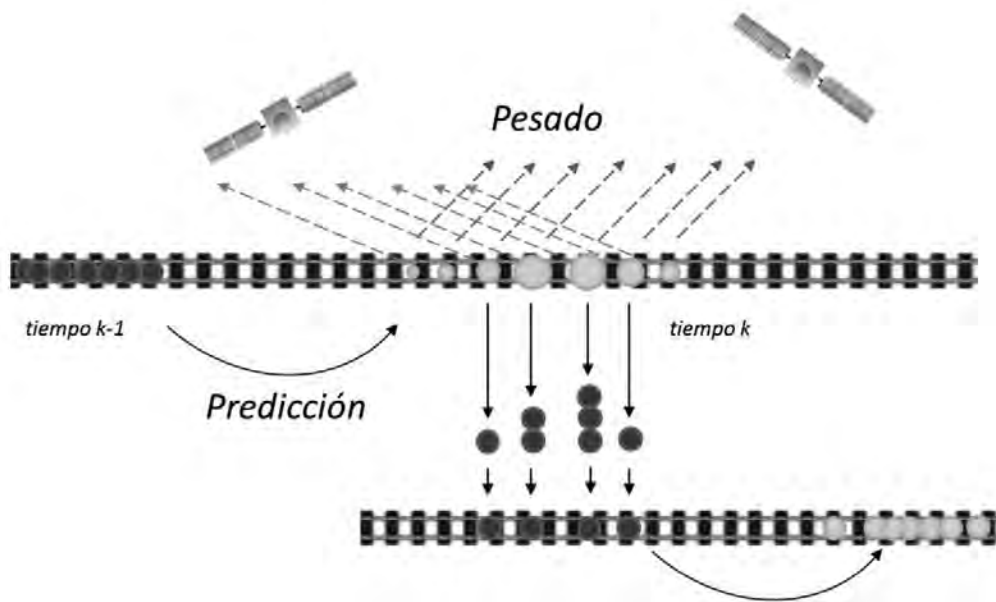


Fig. 4 Filtro de partículas para localización de trenes

4. Validación con medidas reales

El algoritmo propuesto en este artículo ha sido validado con datos reales grabados durante una campaña de medida realizada por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en 2011 en Braunschweig. En concreto, el equipo utilizado consistió en el vehículo RailDrivE®, capaz de rodar por los raíles ferroviarios (Fig. 5, Fig. 6) y preparado para grabar medidas de distintos sensores. Para el objetivo de este artículo, se utilizaron medidas provenientes de un receptor GNSS PolarRx3 y medidas de un sensor inercial de bajo coste Xsens MTx. Para poder disponer de una posición de referencia con la que evaluar los resultados, se utilizó también un taquímetro Leica TCRP 1201 con una base inteligente ATX1230, esta unidad era capaz de seguir un prisma colocado en el vehículo y calcular su posición con precisión de centímetros. Las medidas del taquímetro fueron además utilizadas para la creación del mapa digital de las vías usado en el filtro.



Fig. 5 Ruedas adicionales para desplazarse por las vías



Fig. 6 Instalación para la campaña de medidas

5. Resultados y análisis

En primer lugar se analiza la capacidad del filtro de detectar la vía correcta tras una bifurcación, En la Fig. 7, se observa la evolución de la probabilidad de la vía estimada al pasar tras dos bifurcaciones (Switch). Se puede observar como al llegar a una bifurcación la probabilidad cae al 0.5, ya que las partículas se dividen por igual hacia una vía o la otra. Después, al llegar medidas del sensor inercial sobre el giro, las partículas en la vía incorrecta reciben menos peso y finalmente quedan descartadas.

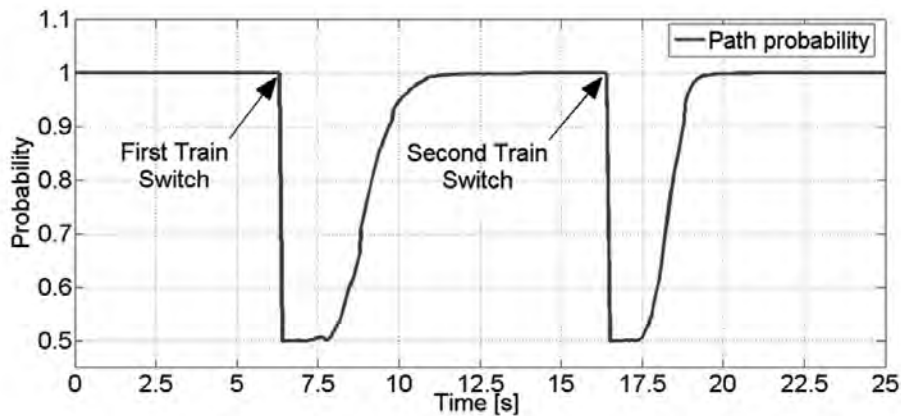


Fig. 7 Evolución de la probabilidad de la vía estimada

Una vez que la vía correcta ha sido detectada, queremos evaluar la precisión que es posible obtener en la posición en la vía. Para ello se analizan tres situaciones diferentes, donde el vehículo pasó por dos bifurcaciones en cada una de ellas. En primer lugar, podemos ver la evolución del error cuadrático medio para el primer recorrido en la Fig. 8, también se ha representado la desviación estándar obtenida, dándonos una idea de la incertidumbre en la posición mediante el nivel de dispersión de las partículas. En la Tabla 1, podemos ver los resultados numéricos para los tres recorridos analizados. Podemos observar cómo se obtiene para todos los casos una precisión media por debajo del metro de error.

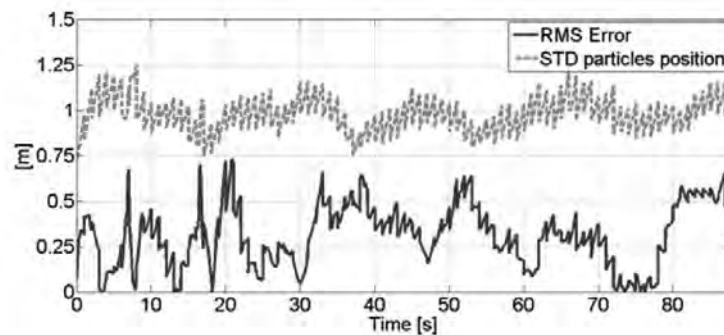


Fig. 8 Error y desviación estándar de la estimación basada en el filtro de partículas para recorrido 1

Tabla 1 Resultados para 3 recorridos con usando todos los satélites en vista

	Error Medio Cuadrático	Error Máximo
Recorrido 1	0.32 m.	1.38 m.
Recorrido 2	0.60 m.	1.46 m.
Recorrido 3	0.73 m.	1.37 m.

Una de las grandes ventajas de utilizar directamente las medidas en bruto del receptor GNSS (pseudorangs y medidas Doppler), es que podemos seguir utilizando esta información aun cuando tenemos menos de 4 satélites a la vista. A continuación se pretende evaluar las prestaciones del algoritmo cuando se usan las medidas de menos de cuatro satélites en el filtro. Para ello se utiliza, el escenario presentado en la Fig. 9, donde se han escogido dos grupos de tres satélites, que geoméricamente contribuyen perpendicularmente con respecto a la dirección media de la vía. De estos grupos también se analiza el algoritmo con sólo dos satélites.

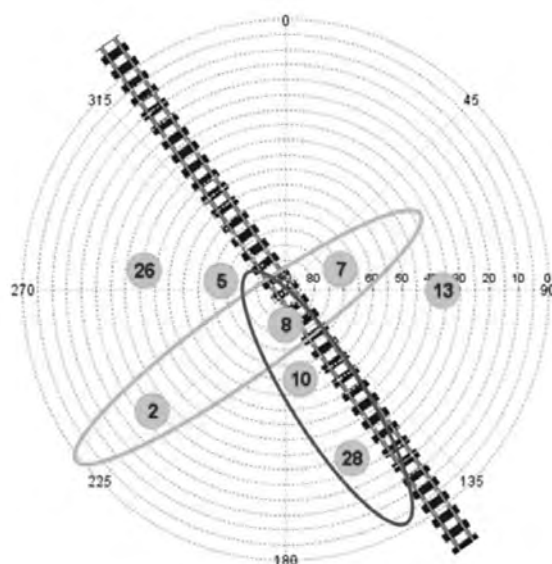


Fig. 9 Posición de los satélites con respecto a la vía en el escenario seleccionado. Escogemos dos grupos de satélites geoméricamente diferentes

En la Tabla 2, podemos ver los resultados obtenidos en términos de error cuadrático medio y máximo error. En primer lugar, las bifurcaciones en todos los casos han sido resueltas satisfactoriamente y la vía correcta detectada usando solamente dos y tres satélites. Se observa una diferencia dependiendo de la geometría de los satélites elegidos. Es muy relevante que aquellos grupos de satélites que están alineados con la dirección de la vía, son capaces de mantener una precisión media por debajo de 1 metro, incluso con dos satélites. Mientras que los grupos de satélites perpendiculares a la vía presentan peores prestaciones. Este hecho es muy beneficioso para la localización de trenes, ya que las situaciones ferroviarias donde las señales de satélites queden bloqueadas serán mayormente por los lados, quedando el cielo más despejado a lo largo de la vía normalmente.

Tabla 2 Resultados en la precisión obtenida para grupos de tres y dos satélites

		Error Medio Cuadrático (RMS)	Error Máximo
Tres satélites	Satélites #: 2, 7, 8	8.37 m.	12.71 m.
	Satélites #: 8, 10, 28	0.72 m.	2.83 m.
Dos satélites	Satélites #: 2,8	11.68 m.	15.70 m.
	Satélites #: 8, 28	0.99 m.	3.34 m.

6. Conclusiones

En este trabajo, la integración entre GNSS y sensores inerciales se ha propuesto como una opción apropiada y con gran potencial para los futuros sistemas de localización ferroviaria. Con esta combinación se ha probado que se puede detectar la vía correcta tras una bifurcación gracias principalmente a los sensores inerciales. Precisiones por debajo de un metro se han obtenido lo que demuestra las altas prestaciones que se pueden llegar a obtener. Los resultados han mostrado también que se puede conseguir una localización robusta incluso con menos de 4 satélites a la vista, lo que aumenta considerablemente las posibilidades y entornos en los que puede ser utilizado, tales como urbanos o montañosos, donde las señales de los satélites pueden estar bloqueadas. Precisamente, la diferencia en los resultados obtenidos para distintas geometrías muestra una situación beneficiosa para entornos ferroviarios donde el cielo a lo largo de la vía suele estar más despejado de obstáculos.

7. Referencias

- [1] B. W. Parkinson and J. J. Spilker Jr., *Global Positioning System: Theory and Applications*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [2] E. D. Kaplan, *Understanding GPS, Principles and Applications*, Artech House, 2005.
- [3] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [4] D. Titterton and J. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd ed., Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [5] D. Koller and N. Friedman, *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*, The MIT Press, 2010.
- [6] O. Garcia Crespillo, O. Heirich and A. Lehrer, "Bayesian GNSS/IMU Tight Integration for Precise Railway Navigation on Track Map," in *IEEE/ION PLANS*, Monterey, CA, 2014.
- [7] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox, *Probabilistic Robotics*, The MIT Press, 2005.
- [8] M. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon and T. Clapp, "A Tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking," *Signal Processing, IEEE Transactions*, vol. 50, no. 2, pp. 174-188, February 2002.
- [9] Eurostat, 2012.
- [10] European Railway Agency (ERA).
- [11] O. Garcia Crespillo, "Map Based Multisensor Railway Localization Enhanced by Raw GNSS Data," 2013.

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.

abril 2015
número 9

**Análisis del cruce entre trenes de alta velocidad
y de mercancías en líneas con tráfico mixto
desde el punto de vista aerodinámico**

Marta Jiménez Cobo

**Aplicación de resortes espirales a torsión en materiales compuestos como
almacenamiento de energía en el sector ferroviario**

Daniel Fernández Caballero, Manuel Esperón Míguez, Víctor Rodríguez de la Cruz

**Optimización de la Política de Reperfilado de Ruedas para el Citadis 302,
en la explotación de Metro Liger Oeste**

María Victoria Alba Díaz

Diseño Operativo, Comercial y Económico del Tren Turístico

Verónica Álvarez Fernández

Extensión del ancho UIC a Zaragoza para trenes de mercancías

Eduardo Palacín Biarge

**Sistema de Conducción Automática de Trenes (ATO), para la Línea – 4
del FC Metropolità de Barcelona**

Montserrat Artigas Palomeque, Pau Picas Martínez

**Sistema Bayesiano de Localización de Trenes Basado en Medidas GNSS
y Sensores Inerciales**

Omar García Crespillo



FUNDACIÓN DE LOS
FERROCARRILES
ESPAÑOLES

www.ffe.es

Número 9. Monográfico con los
trabajos galardonados en el
"III Premio Tria Railway
RD para Jóvenes
Ingenieros Ferroviarios"

