



Estudio del comportamiento de materiales compuestos reforzados con fibra utilizados para el revestimiento de vehículos ferroviarios



- Sistema de inspección de pantógrafos de trenes mediante visión artificial
- Sistema de prueba de freno en estaciones de clasificación de vagones de mercancías
- Estudio del desgaste ondulatorio de una vía con mantas resilientes bajo placa de hormigón mediante el análisis de su comportamiento vibratorio
- Evaluación de la repercusión económica ligada al coste energético de las limitaciones de velocidad con precauciones en las líneas férreas
- Nueva red ferroviaria del corredor mediterráneo
- Simulación de accesibilidad a vehículos ferroviarios
- Proyecto VANELECTRA: Transporte de mercancías ligeras por líneas ferroviarias de altas prestaciones

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



Edita:



Consejo asesor:

José Luis López Gómez
Premio TALGO

Sergio Lopez Lara
Premio TRIA Railway R&D

Andrés López Pita
Aula y Premio COMSA

Eduard Rodés
Director Escola Europea de Short Sea Shipping

Eduardo Romo Urroz
Fundación Caminos de Hierro

Emilio Larrode Pellicer
Universidad de Zaragoza

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

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

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

José Cañizares Moyano
Asociación Europea de Ferroviarios

Consejo de redacción:

Pilar Lozano (Directora editorial, FFE)

Ángeles Tauler (FFE)

Alberto García (Renfe Operadora)

Yolanda del Val (FFE)

Antonio Berrios (ADIF)

J. Mariano Rodríguez (Secretario, FFE)

Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria

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

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

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

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

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

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

La revista en formato digital puede ser descargada gratuitamente en:

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

Edita:

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

ISSN: 2174-0194

El número 6 de la revista *Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria* recoge los trabajos galardonados en el "II 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 2012-2013. A esta edición del premio concurrieron 6 trabajos. El jurado, de acuerdo con las bases de la convocatoria, escogió el primer premio, entendiendo 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 Juan Pedro Pastor Valdés, y formaron parte del mismo como vocales, Alberto García Álvarez, Sergio López Lara, Javier Romero y Juan de Dios Sanz Bobi.

Índice

Estudio del comportamiento de materiales compuestos reforzados con fibra utilizados para el revestimiento de vehículos ferroviarios	7
Juan Luis Martínez Vicente	
<i>Universidad de Castilla-La Mancha (Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos - ETSII Ciudad Real)</i>	
Sistema de inspección de pantógrafos de trenes mediante visión artificial	23
Ícaro Álvarez Giménez	
<i>Universidad de Vigo (Grupo de Diseño y Automatización de Sistemas Avanzados)</i>	
Sistema de prueba de freno en estaciones de clasificación de vagones de mercancías	33
Sergio Granda Torres	
<i>Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)</i>	
Estudio del desgaste ondulatorio de una vía con mantas resilientes bajo placa de hormigón mediante el análisis de su comportamiento vibratorio	49
Carla García Román	
<i>Universidad Politécnica de Valencia (Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes)</i>	
Evaluación de la repercusión económica ligada al coste energético de las limitaciones de velocidad con precauciones en las líneas férreas	63
Rafael Navarro López	
<i>Universidad Politécnica de Valencia (Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes)</i>	
Nueva red ferroviaria del Corredor Mediterráneo	77
Joan Saura Serrat	
<i>Universidad Politécnica de Cataluña (ETS de Ingenieros Industriales de Vilanova)</i>	

ANEXOS

Simulación de Accesibilidad a Vehículos Ferroviarios	93
Juan Carlos Carrasco Giménez, José Luis Porras Caballero, Diego Pedrosa Espinosa	
<i>Departamento de I+D de TRIA Railway R&D. Centro de Tecnologías Ferroviarias ADIF (Málaga)</i>	
Proyecto VANELECTRA: Transporte de mercancías ligeras por líneas ferroviarias de altas prestaciones	109
Pablo Gadea Garzón	
<i>ICCP. TRIA Railway R&D</i>	

Papers

Study of the fiber-reinforced composites behavior used for railway vehicles 7

Juan Luis Martínez Vicente

Universidad de Castilla-La Mancha (Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos - ETSII Ciudad Real)

Abstract: In this document, the experimental and numerical procedure followed to develop the Master Thesis “Study of the fiber-reinforced composite’s behavior under biaxial loading” is summarized. Its main results and conclusions achieved are also shown.

Throughout this study uniaxial and biaxial tests are developed in order to characterize the material to observe its behavior under multi-axial loads. The material is a composite of polyester matrix reinforced with glass fiber, used in the manufacture of the internal and external parts of subway, regional trains, and medium and long distance.

Keywords: Rail Transport. Composite. Polyester matrix. Glass Fiber chopped. Finite Element Method. Biaxial Testing.

Inspection system for train pantographs based on computer vision techniques 23

Ícaro Álvarez Giménez

Universidad de Vigo (Grupo de Diseño y Automatización de Sistemas Avanzados)

Abstract: The pantograph is the mechanism that acquires the energy necessary to power the electric motor of a train. Currently, maintaining of pantograph of trains is performed manually, requiring switch off the catenary power and an operator climbing up to the train. A damaged pantograph could damage the catenary infrastructure and the consequent closure of this route until the reparation is done. This project aims, through computer vision techniques, carrying out the pantograph inspection autonomously, fast and accurate, reducing risks, human error, maintenance time and therefore making a significant competitive advantage.

Keywords: Pantograph, train maintenance, computer vision.

Brake test unit for marshalling yard of freight wagons 33

Sergio Granda Torres

Universidad Pontificia de Comillas (Madrid)

Abstract: The aim of this paper is to provide the development of a brake testing system in marshalling of freight wagons. A new system has been developed, which can be coupled in parallel to the brake system of any locomotive with a control system in order to perform the assay. Therefore, a single operator or the train driver himself, with the help of a portable mobile unit may act on the knob locomotive brake remotely while reviewing the various leak phases such as: fastening and loosening the brake as it travels the composition of coupled wagons.

Keywords: Freight wagons, brake, marshalling yard, brake test.

Study of the Rail Corrugation in a track with elastic material under concrete plate through the analysis of its vibratory behavior 49

Carla García Román

Universidad Politécnica de Valencia (Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes)

Abstract: Rail corrugation is a pathology that appears in almost all railroads, causing a progressive corrugation at the head of the rail that leads to an increase of costs for track maintenance. The most common way to deal with it is the use of corrective measures (grinding). However, in the present study aims to investigate the implementation of a preventive measure to prevent its appearance. To do this, it has analyzed the influence of elastic material placed under concrete plate in the vibratory behavior of a track through mathematical modeling. The results show a reduction in the amplitude of the vibration and a modification of their frequencies.

Keywords: Rail corrugation; Elastic material; Simulink; Frequency spectrum

Energetic and economic evaluation temporary of speed limitations in railways 63

Rafael Navarro López

Universidad Politécnica de Valencia (Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes)

Abstract: In railway operation, one of the most important parts of the investment is the energy consumption. With the objective of optimizing the railway system and energy resources, the intention is to evaluate the temporary speed restrictions, which influence the energy consumption. For this reason, by modelling the energy consumption in a train, which runs the railway service and creating a hypothesis of consumption without the speed's limitation, one will evaluate its influence. On the other hand, one will have to estimate the cost of the correction of the defects, which are the cause of the speed restrictions. By comparing this cost with the extra energy cost the economic profitability of track repairing is evaluated.

Keywords: Energy Consumption, optimize, temporary restrictions, railway system.

New rail network for the Mediterranean corridor 77

Joan Saura Serrat

Universidad Politécnica de Cataluña (ETS de Ingenieros Industriales de Vilanova)

Abstract: The project starts with an analysis of the existing railway network in the Mediterranean corridor. Combining the present state with the existing planning, all shortcomings detected are analyzed. Knowing the European standards for interoperability, a new rail network is designed in order to solve all the existing conflicts in the Spanish net between the French and the Portuguese border, both for high speed and freight traffic. In addition, the study proposes the necessary steps in order to develop the new network, considering the traffic demand in all the different itineraries studied.

Keywords: Mediterranean Corridor, Interoperability, High speed, Infrastructure planning, Net effect.

ANNEXES

Simulation of Accessibility to Railway Vehicles 93

Juan Carlos Carrasco Giménez, José Luis Porras Caballero, Diego Pedrosa Espinosa

Departamento de I+D de TRIA Railway R&D. Centro de Tecnologías Ferroviarias ADIF (Málaga)

Abstract: Peoples' accessibility to the mode of transport, is one of the main inconveniences that appears during transport operations, in particular for rail travel. A new electromechanical system has been developed to analyse this problem. The system located at the Station Laboratory, of the ADIF's Railway Technologies Centre, allows multiple accessibility scenarios on any platform to be simulated. This system is characterized by its great versatility, allowing the adoption of the required configuration to simulate any current RENFE's train, historical rolling stock, trains currently under design or even future designs.

Keywords: Accessibility, TSI, gauge, platform, interoperability, PRM.

VANELECTRA Project: Intermodal transportation system for light freights and road vehicles across high velocity railway lines 109

Pablo Gadea Garzón

ICCP. TRIA Railway R&D

Abstract: VANELECTRA Project aims to develop an intermodal transportation system, designed to facilitate the movement of goods and light road vehicles through high-performance railway lines. The combination of versatility road electric vehicle, and railway efficiency to move large loads over long distances with a powerful set in the technical, ecological and social.

Keywords: Electric vehicle, power consumption, light freights, high velocity lines.

Estudio del comportamiento de materiales compuestos reforzados con fibra utilizados para el revestimiento de vehículos ferroviarios

Study of the fiber-reinforced composites behavior used for railway vehicles

Juan Luis Martínez Vicente

Área de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Ciudad Real, Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales.
Universidad de Castilla-La Mancha

Resumen

En este artículo se recoge de forma sintetizada el proceso tanto experimental como numérico seguido para la realización del Trabajo Fin de Máster titulado “Estudio del comportamiento de materiales compuestos reforzados con fibra ante estados de carga biaxiales”. También se muestran los resultados y conclusiones a las que se ha llegado.

A lo largo de dicho estudio se han llevado a cabo ensayos uniaxiales y biaxiales, con el fin de caracterizar mecánicamente el material analizado y de observar su comportamiento ante cargas multiaxiales. En los ensayos realizados se ha utilizado un material compuesto reforzado con fibra de vidrio, usado en la fabricación de diferentes elementos de revestimiento para los actuales vagones de metro, cercanías, media distancia y larga distancia.

Palabras clave: Transporte Ferroviario. Material Compuesto. Matriz de Poliéster. Fibra de Vidrio aleatoriamente distribuida. Método de los Elementos Finitos. Ensayo Biaxial.

Abstract

In this document, the experimental and numerical procedure followed to develop the Master Thesis “Study of the fiber-reinforced composite’s behavior under biaxial loading” is summarized. Its main results and conclusions achieved are also shown.

Throughout this study uniaxial and biaxial tests are developed in order to characterize the material to observe its behavior under multiaxial loads. The material is a composite of polyester matrix reinforced with glass fiber, used in the manufacture of the internal and external parts of subway, regional trains, and medium and long distance.

keywords: Rail Transport. Composite. Polyester matrix. Glass Fiber chopped. Finite Element Method. Biaxial Testing.

1. Introducción y objetivos

En la actualidad, el uso de materiales compuestos reforzados con diferentes fibras (CFRP, GFRP) está muy extendido en numerosas aplicaciones. Inicialmente se utilizaron en el sector aeroespacial y aeronáutico buscando materiales que cumpliesen con las exigentes condiciones de trabajo a las que estaban sometidos [1]. Desde ese momento hasta el día de hoy, la investigación e innovación en nuevas aplicaciones para estos materiales ha permitido que el uso de elementos constituidos por materiales compuestos haya ganado terreno en industrias como la naval y la automovilística, imponiéndose en sectores como el de la energía eólica. La industria del ferrocarril no se ha quedado atrás y también se ha aprovechado de las ventajas que aportan estos materiales frente a los utilizados tradicionalmente, siendo la fabricación de diferentes elementos dedicados al revestimiento de vehículos ferroviarios una de las aplicaciones más significativas.

Al igual que en otras aplicaciones, en los materiales compuestos utilizados en la fabricación de distintas partes de los vagones de ferrocarril se pueden encontrar situaciones de carga que generan estados multiaxiales de tensión ante condiciones de uso normales [2, 3]. Este hecho sumado al escaso conocimiento que se tiene de la rotura de materiales compuestos ante estados de carga complejos, sirven de motivación para la elaboración de este trabajo. De tal forma, con el fin de determinar el comportamiento del material estudiado ante un estado complejo de tensiones, se han realizado un conjunto de ensayos biaxiales. Buscando obtener las propiedades elásticas del material, se han llevado a cabo una serie de pruebas uniaxiales mediante la aplicación de cargas de tracción en probetas normalizadas de sección rectangular constante. El material utilizado durante todo el estudio ha sido un material compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibra de vidrio aleatoriamente distribuida [4, 5, 6], utilizado en diferentes vehículos ferroviarios para la fabricación de elementos de revestimiento.

Existen estudios recientes tanto numéricos como experimentales sobre diferentes técnicas para producir estados biaxiales de tensión en el material ensayado. Estas técnicas se pueden clasificar según el sistema de carga utilizado en el experimento [7]. Así, podemos tener ensayos biaxiales debidos a una única carga aplicada sobre la probeta de ensayo o con dos o más cargas aplicadas de forma independientemente. De estos dos métodos de ensayo, se ha optado por el segundo, eligiendo una técnica que consiste en la aplicación de cargas en el plano a lo largo de los brazos perpendiculares de una probeta cruciforme [8, 9, 10, 11]. Para el diseño de las probetas ensayadas, se ha elegido una geometría cruciforme utilizada en trabajos anteriores [1], introduciendo algunas modificaciones para adaptarlo a las actuales condiciones de ensayo.

A partir de dicha técnica experimental, el trabajo realizado ha perseguido la determinación del comportamiento mecánico del material compuesto estudiado y la obtención de la curva de fallo biaxial de dicho material. Con tal fin, se ha desarrollado una metodología de trabajo consistente en la realización de ensayos biaxiales aplicando cargas en el plano en una probeta cruciforme. La curva de fallo biaxial del material se ha conseguido a partir de las deformaciones medidas mediante galgas extensométricas en los ensayos que han presentado modos de fallo correctos. Los resultados experimentales obtenidos se han verificado con los numéricos extraídos de las simulaciones llevadas a cabo con el código de elementos finitos (MEF) ANSYS® 13.0 RELEASE [12].

El camino seguido para la consecución de los objetivos indicados se muestra en este artículo organizado en los siguientes apartados. En el apartado 2 se define el concepto de material compuesto y se describe el material compuesto ensayado. En el apartado 3 se muestra la instalación experimental utilizada para llevar a cabo los ensayos experimentales, así como el procedimiento seguido en los mismos. En el apartado 4 se muestran los resultados experimentales y numéricos obtenidos y se determina la curva de fallo biaxial del material de estudio a partir de los datos conseguidos mediante la utilización de galgas extensométricas. Finalmente, en el apartado 5 se enumeran las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del trabajo. Tras este último apartado, se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas durante la preparación y elaboración de este artículo.

2. Material compuesto estudiado

Los materiales compuestos nacen de la convergencia entre necesidad e ingenio, dando lugar a nuevos materiales con propiedades que proporcionan una mayor efectividad en sus distintas aplicaciones [13]. Un material compuesto se puede definir como la combinación de dos o más materiales para formar un nuevo material que posea las propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de los constituyentes actuando de forma aislada [14]. De tal manera, los materiales compuestos sustituyen a los materiales utilizados tradicionalmente salvando sus limitaciones. Aunque también podemos encontrarlos cumpliendo con exigentes requisitos propios de las aplicaciones más novedosas, mejorando propiedades como la rigidez, el peso, la resistencia a la corrosión, la resistencia a la abrasión, la vida a fatiga, el aislamiento acústico y térmico.

Como se ha definido en el párrafo anterior, un material compuesto está formado por la unión de dos o más materiales, que se identifican según la tarea que lleven a cabo en el nuevo compuesto. Por lo tanto, para realizar una clasificación aceptable de este tipo de materiales, primero se debe diferenciar entre la matriz o fase continua (encargada de dar cohesión y continuidad al conjunto) y la fase dispersa (refuerzo embebido en la matriz que soporta la mayor parte de las solicitaciones que recaen sobre el conjunto).

De tal forma, los materiales compuestos se pueden clasificar en base a la naturaleza de su matriz o en función del refuerzo utilizado. En base a estos criterios de clasificación, el material utilizado en este trabajo se puede describir como un material compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibra de vidrio discontinua aleatoriamente distribuida. Este material se ha adquirido en la empresa Revestimientos Luna Freire SL que se dedica a la elaboración de componentes para diferentes aplicaciones. Concretamente, utilizan este tipo de material para fabricar determinadas partes de vehículos ferroviarios, como muestran las siguientes imágenes.



Fig. 1. Testeros locomotora¹.



Fig. 2. (a) y (b) Montantes interiores².

El material ha sido suministrado en forma de placas cuadradas de 1 m de lado y 4.5 mm de espesor medio. El proceso de fabricación que esta empresa sigue para obtener este tipo de material se denomina *Hand Lay-Up* y consiste en la colocación manual tanto de las fibras de vidrio distribuidas aleatoriamente como de la resina de poliéster. Debido a este proceso particular de fabricación, el espesor de las placas no es exactamente uniforme. La cantidad de fibra dispuesta en dicho material compuesto es aproximadamente un 20 % de todo el volumen. Posteriormente dichas placas han sido mecanizadas en el taller de fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Ciudad Real (ETSII) de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) para obtener el perfil de probeta buscado en cada tipo de ensayo llevado a cabo.

En cuanto al comportamiento mecánico del material, se considera elástico lineal cuasi-isótropo debido a la aleatoriedad de la distribución de las fibras [15]. Esta suposición se ha comprobado mediante una serie de ensayos uniaxiales, en los que se ha obtenido un módulo de elasticidad medio de 6.5 *GPa*, un coeficiente de Poisson aproximado de 0.37 y una tensión de rotura media de 90 *MPa*. No superando, en el peor caso, la desviación típica de los resultados conseguidos el 10 % respecto de

^{1 y 2} Imágenes tomadas de la página web de la empresa Revestimientos Luna Freire SL, situada en Piedrabuena (Ciudad Real).

los valores medios. Dicho valor del módulo de elasticidad es coherente con el obtenido teóricamente a partir de la expresión modificada de la *Rule of Mixtures* (ROM) que se muestra en la siguiente ecuación [16]:

$$E_{\text{compuesto}} = k V_{\text{fibra}} E_{\text{fibra}} + V_{\text{matriz}} E_{\text{matriz}} \quad (1)$$

donde k es el factor de eficacia y, para nuestra distribución de fibras (aleatoria), su valor se considera $3/8$ [17]. Para la proporción de fibra y de matriz en el volumen total de material, se han considerado los siguientes valores; $V_{\text{fibra}} = 20/100$ y $V_{\text{matriz}} = 80/100$, respectivamente. Se han tomado como módulos de elasticidad típicos para la fibra de vidrio y para la resina de poliéster $E_{\text{fibra}} = 70 \text{ GPa}$ y $E_{\text{matriz}} = 2 \text{ GPa}$, respectivamente [18].

En las siguientes gráficas se muestran los valores de tensión y deformación para un ensayo uniaxial representativo, así como el coeficiente de Poisson, finalizando dicho ensayo con la rotura del material.

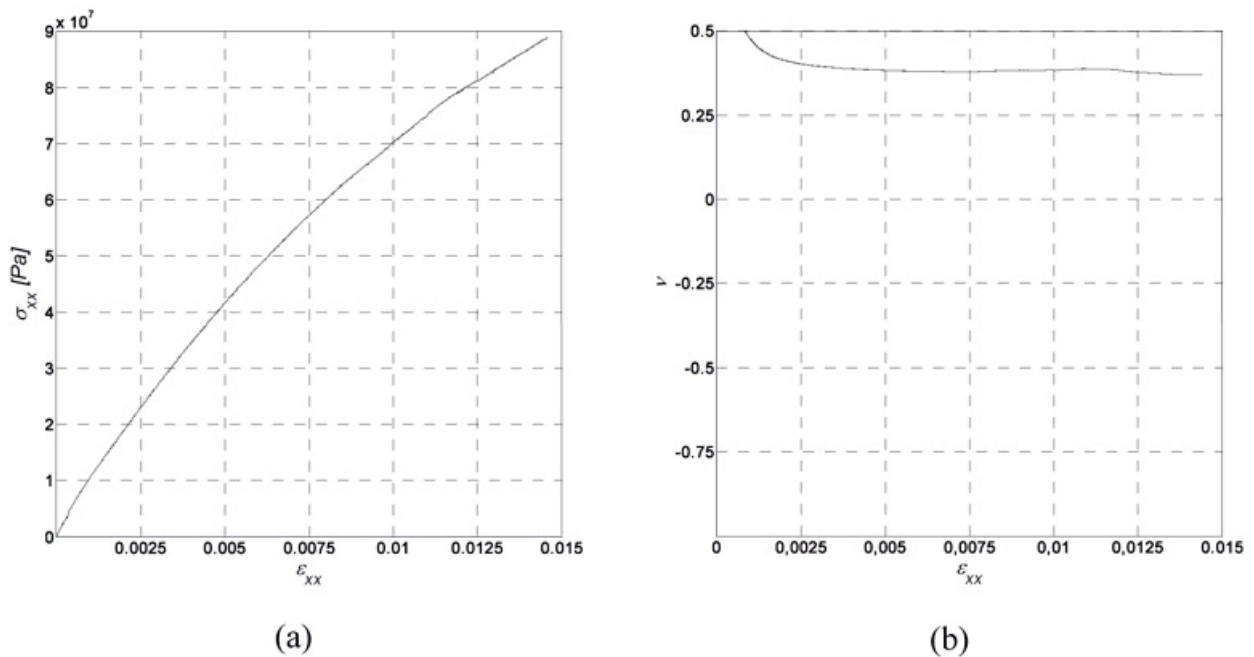


Fig. 3. (a) Curva Uniaxial Tensión-Deformación; (b) Curva Uniaxial Coeficiente de Poisson-Deformación.

Al observar la Figura 3 se llega a la conclusión de que el material apenas se deforma plásticamente antes de su fractura, considerando la tensión de límite elástico igual a la de rotura. Por lo que como hipótesis de trabajo, se asume un comportamiento elástico lineal con el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson especificados anteriormente. Además, al realizar ensayos en diferentes direcciones de la plancha cuadrada de material compuesto adquirida, se ha comprobado el comportamiento cuasi-isótropo del material estudiado.

3. Procedimiento experimental

3.1 Máquina triaxial

Existen diferentes técnicas para el estudio experimental del comportamiento de materiales compuestos aplicando carga en más de una dirección [19, 20, 21]. En este trabajo, para realizar los diferentes ensayos, se ha utilizado la máquina que se muestra en la Figura 4 y cuyo diseño se basa en la instalación de [20]. Con esta máquina se pueden llevar a cabo ensayos tanto de tracción como de compresión en las tres direcciones espaciales utilizando 6 actuadores electromecánicos opuestos dos a dos.



Fig. 4. Máquina triaxial del Área de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras (MMCC).

Los actuadores están dispuestos como muestra la Figura 5, es decir, cuatro de ellos se encuentran en el plano horizontal, mientras que los dos restantes están en el eje vertical. En la imagen, los actuadores verticales se ven desprovistos de mordazas porque no se han utilizado para este trabajo. En el actuador superior vertical, se ha colocado un útil que permite orientar diferentes instrumentos de medida.



(a)



(b)

Fig. 5. (a) y (b) Detalle de la posición de los actuadores de la máquina triaxial.

A lo largo de toda la fase experimental, todos los ensayos se han desarrollado en el plano horizontal, Figura 6. Dicha máquina triaxial se encuentra en la ETSII de la UCLM y fue fabricada por la empresa Microtest SA bajo pedido del Área de MMCC.

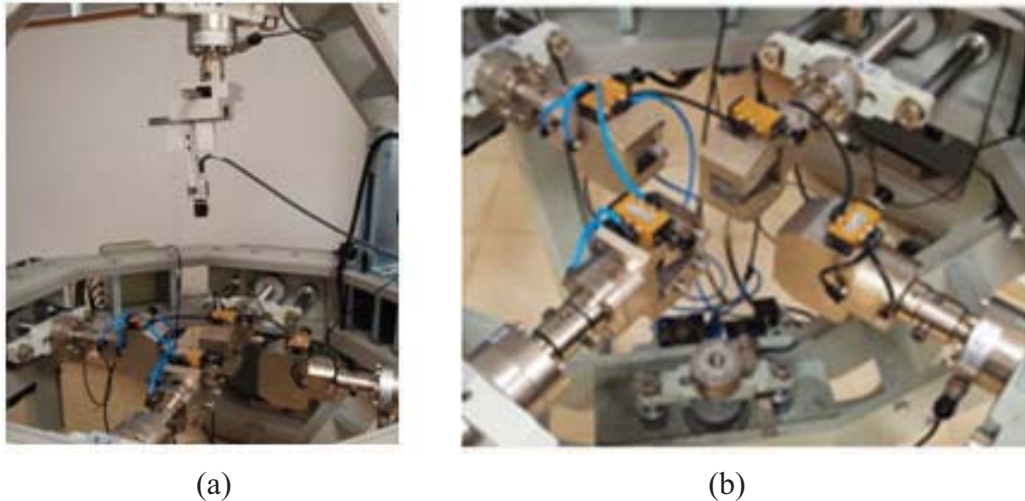


Fig. 6. (a) Ensayo uniaxial; (b) Ensayo biaxial

La carga máxima que puede aplicar cada uno de los actuadores de la máquina, tanto a tracción como a compresión, es de 50 *kN*. Cada actuador puede desplazarse como máximo 50 *mm*, tanto alejándose como acercándose a su actuador opuesto. Para hacer posible el agarre de las probetas a ensayar, la máquina tiene montada en cada actuador una mordaza neumática de 40 *mm* de mordida. El control de la máquina es posible mediante un software propio que permite gobernar el ensayo de dos formas diferentes, bien controlando el desplazamiento realizado por los actuadores o controlando la fuerza aplicada. De tal manera, la señal de desplazamiento se regula y se graba mediante un encoder y la fuerza aplicada se registra mediante cuatro transductores de fuerza. En este trabajo se ha utilizado la opción de control de fuerza aplicada cuasi-estáticamente, con distintas relaciones de carga en las dos direcciones del plano y finalizando el ensayo con la rotura de la probeta.

3.2 Extensometría

Para conocer el estado de deformaciones generado en el material estudiado, y a partir de ellas calcular las tensiones desarrolladas a causa de las cargas aplicadas, se han utilizado bandas o galgas extensométricas. Las galgas extensométricas son elementos resistivos que se pegan a la estructura o probeta de ensayo, deformándose solidariamente con el material. Sus dimensiones varían según las características del ensayo y sus especificaciones se eligen en función del material y del ensayo que se va a llevar a cabo. Esta tecnología permite medir la deformación media en una región pequeña de una estructura cargada a partir de la variación de la resistencia eléctrica de la propia banda [22]. Al elegir la extensometría para la medición de deformaciones, se ha tenido presente que esta técnica devuelve una información media. Según esto, su uso ha de ser selectivo, por lo que las galgas extensométricas se han colocado en zonas consideradas de mayor importancia en el ensayo. Las galgas extensométricas utilizadas para la medición de las deformaciones generadas han sido de la marca KYOWA [23, 24]. En la siguiente figura se muestran dos tipos de estas galgas, capaces de medir la deformación generada en una dirección, Figura 7 (a), o en tres direcciones, Figura 7 (b).



Fig. 7. Tipos de galgas extensométricas según medida de deformaciones:
(a) Una sola dirección; (b) Tres direcciones.

Estos elementos resistivos se conectan a un sistema de adquisición de la misma marca que las galgas, denominado PCD-300B, que nos permite traducir la señal obtenida durante el ensayo a la magnitud que queremos observar, Figura 8. Este equipo consta de cuatro canales y mediante un software propio nos permite visualizar en tiempo real la señal que recoge cada canal en forma de microdeformaciones, así como almacenar y devolver en un archivo excel dichos valores de deformación recogidos por cada canal y asociados al tiempo de duración del ensayo completo.



Fig. 8. Sistema de adquisición.

3.3 Diseño de probeta de ensayo

Tanto el diseño como los planos de las probetas ensayadas se han elaborado con el software de modelado sólido (CAD) SolidWorks® 2011 [25], y a partir de ellos se han fabricado las distintas probetas ensayadas. Para los ensayos uniaxiales se han utilizado probetas de sección rectangular constante con 20 mm de ancho, 200 mm de largo y 4.5 mm de espesor medio, Figura 9 (a). Estas probetas se han cargado longitudinalmente a tracción agarrándolas por sus extremos mediante las mordazas neumáticas de la máquina triaxial, como se mostró en la Figura 6 (a). Para la medida de la deformación longitudinal conseguida se ha colocado una galga en la dirección de la carga aplicada, Figura 9 (b). El ensayo se ha prolongado hasta la rotura de la probeta [26, 27].

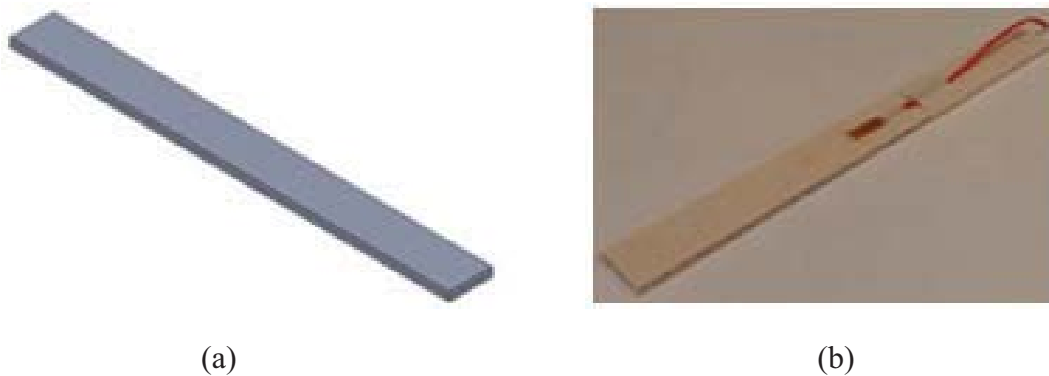


Fig. 9. (a) Modelo 3D con SolidWorks® de la probeta uniaxial; (b) Probeta uniaxial con galga pegada.

En los ensayos biaxiales se ha utilizado un diseño de probeta cruciforme basado en trabajos anteriores [1], en el que se han introducido algunos cambios, Figura 10 (a) y (b). Dichos cambios han consistido en adaptar el diseño original a las dimensiones de la máquina triaxial utilizada para realizar los ensayos, teniendo en cuenta aspectos como el ancho de mordida de las mordazas neumáticas y el recorrido máximo de los actuadores. También se ha previsto la superficie que ocupan las rosetas triaxiales colocadas en la zona central de las probetas para medir las deformaciones conseguidas, ajustando las dimensiones del rebaje de dicha zona a las de la roseta triaxial.

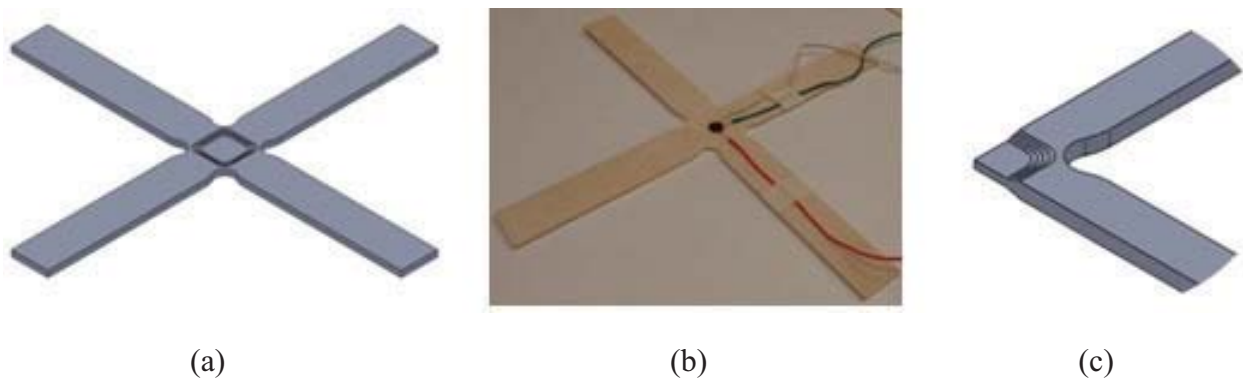


Fig. 10. (a) Modelo 3D con SolidWorks® de la probeta cruciforme; (b) Probeta cruciforme con roseta pegada; (c) Detalle zona central rebajada.

El diseño de esta probeta cruciforme persigue localizar un estado biaxial de tensiones en la zona central de la misma, dónde se produce la intersección de ambos brazos, a partir de la aplicación de una carga a tracción en la dirección longitudinal de cada brazo. Como se observa en la Figura 10 (c), la zona central de las probetas se ha rebajado por ambas caras con el fin de favorecer la aparición de un estado de tensiones mayor en la zona rebajada que en el resto de la probeta. También se pueden apreciar en el diseño de la probeta cruciforme unos radios de acuerdo en la unión de los brazos, con el fin de disminuir la concentración de tensiones en esta zona.

4. Resultados experimentales y numéricos

En este apartado, se muestran los resultados de los estudios experimental y numérico, que llevarán a la determinación de la curva de fallo biaxial del material. Dicha curva se ha definido en términos de deformación y en términos de tensión. Su representación se ha conseguido a partir de los resultados experimentales, tras validarlos mediante las simulaciones numéricas realizadas.

En primer lugar, se ha observado el estado de deformaciones generado en la zona central de la probeta cruciforme utilizando galgas extensométricas y un sistema de adquisición de datos, como se explica en el apartado 3. A partir de dichas deformaciones se ha calculado el estado de tensiones biaxial correspondiente mediante las relaciones de Tensión Plana [33]. En segundo lugar, se han modelado un conjunto de probetas con dimensiones idénticas a las ensayadas experimentalmente mediante un programa de modelado sólido (CAD) SolidWorks® 2011. Con estos modelos se ha llevado a cabo un análisis numérico mediante el método de elementos finitos (MEF), utilizando el programa ANSYS® 13.0 RELEASE para estudiar su comportamiento y analizar el estado biaxial de tensiones y de deformaciones conseguido en la zona central de dichas probetas en el momento de la rotura del material. De esta forma se han observado tanto la tensión como la deformación alcanzada por el material en ese instante en dicha zona central.

En el estudio numérico se ha analizado únicamente un cuarto del modelo y la mitad de su espesor (Figura 11), a pesar de la forma de cruz completa de las probetas ensayadas. Esta simplificación se ha realizado aprovechando la simetría del diseño y buscando un ahorro en el coste computacional del análisis numérico. En la Figura 11 (b) se observa como ejemplo el mallado conseguido en uno de los modelos simulados, mostrando en detalle la zona central de dicho modelo. Para elegir el tipo de elemento y el tamaño de malla utilizados, se ha estudiado la convergencia a la solución dependiendo del número de elementos. Tras valorar las distintas posibilidades, se ha elegido el elemento SOLID 285 por proporcionar resultados coherentes con los resultados experimentales y por su versatilidad a la hora de obtener un mallado adecuado de la zona central del modelo

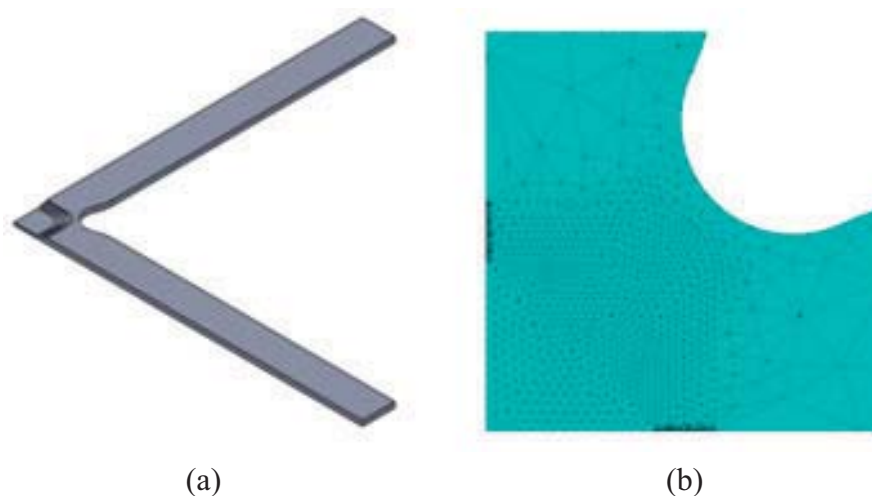


Fig. 11. (a) Modelo 3D para importar con ANSYS®; (b) Detalle de la zona central del mallado de un modelo ensayado.

A modo de ejemplo, a continuación se representan la tensión y la deformación de rotura en la dirección x e y , obtenidas en la simulación del modelo mallado de la figura anterior al aplicar la misma carga en las direcciones perpendiculares. En todos los mapas tanto de tensión como de deformación se realiza un zoom en la zona central del modelo. Dicha zona es donde comienza el fallo del material debido a que se alcanzan las mayores tensiones. En cada imagen, se representan los valores calculados por nudo. Se ha seleccionado esta opción de representación en vez de por elemento, porque se obtiene una ilustración más cómoda de visualizar.

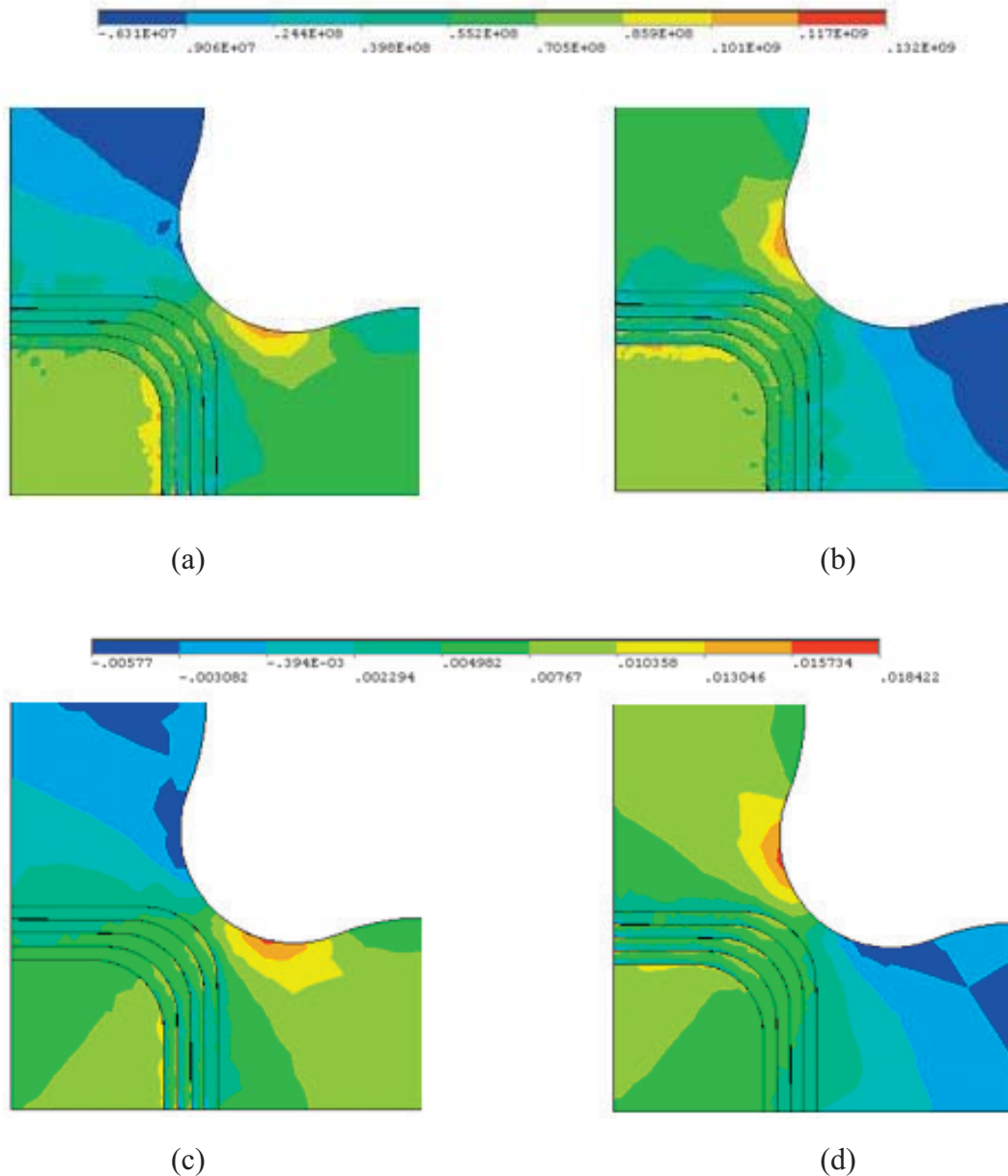


Fig. 12. (a) y (b) Simulación de la tensión en la dirección x e y (σ_{xx} y σ_{yy}) [MPa], respectivamente; (c) y (d) Simulación de la deformación en la dirección x e y (ϵ_{xx} y ϵ_{yy}), respectivamente.

En todas las simulaciones realizadas, se ha observado en la zona central de cada modelo que la tensión tangencial (τ_{xy}) es despreciable en comparación con las tensiones en las direcciones x e y (σ_{xx} y σ_{yy}). Es decir, la componente tangencial (τ_{xy}) del vector tensión es mucho menor que las componentes normales (σ_{xx} y σ_{yy}). Por lo tanto, se puede afirmar que se ha conseguido un estado de tensión biaxial definido mediante las tensiones normales del vector tensión, comprobándose el uso correcto de la hipótesis de Tensión Plana para el cálculo del estado de tensiones biaxial generado a partir de las deformaciones medidas. Esto se debe al diseño de la probeta y a la forma de aplicar la carga, que permiten realizar ensayos biaxiales en las direcciones principales. Las máximas tensiones se han conseguido en los redondeos de las esquinas formadas por la unión entre brazos, debido a la concentración de tensiones en dicho punto. Por esta razón, se ha considerado que el inicio de la rotura de la probeta ha ocurrido en dicha esquina.

En la tabla siguiente se recoge un ejemplo de los resultados de tensión y la deformación observados en las direcciones x e y , en el momento de la rotura del material en la zona central de la probeta. Se realiza una clasificación de estos resultados en función del método utilizado para obtener los valores mostrados. En esta tabla no aparecen los valores de deformación en la dirección xy . Esto se debe a que el valor de la componente ε_{xy} de la deformación desarrollada en la zona central es despreciable en comparación al resto de las componentes contenidas en el plano (ε_{xx} y ε_{yy}). Se muestran los valores de las deformaciones medidas escalados en milideformaciones para una mejor apreciación y comparación con el resto de resultados en el siguiente apartado.

Tabla 1. Tensión y Deformación obtenidas de forma experimental y numérica, en las direcciones x e y .

Método	σ_{xx} [MPa]	σ_{yy} [MPa]	$m\varepsilon_{xx}$	$m\varepsilon_{yy}$
Extensimetría	86.61	83.07	8.59	7.85
MEF	84.45	78.10	8.67	8.27

Tras observar todos los resultados obtenidos, se puede afirmar que se obtienen valores coherentes y aceptables tanto para la tensión como para la deformación al comparar los resultados experimentales con los numéricos. Aunque si comparamos los valores de deformación obtenidos experimentalmente a partir de galgas extensométricas con los conseguidos en las simulaciones mediante MEF, se observa una diferencia debida a las simplificaciones realizadas y a los errores experimentales, como los de medida, sensores y actuadores.

En las siguientes gráficas se muestran las curvas de fallo biaxial en términos de tensión y en términos de deformación para cuatro resultados representativos de todos los ensayos biaxiales realizados con cargas iguales en los brazos y obtenidos a partir de galgas extensométricas. En dichas gráficas también se incluyen los valores medios de tensión y de deformación de rotura conseguidos en los ensayos uniaxiales iniciales y se representa la curva de ajuste de los puntos obtenidos con otras relaciones de carga en los brazos. Los resultados experimentales mostrados corresponden a ensayos realizados a tracción, por esto solo se tienen puntos en el primer cuadrante de la curva σ_{xx} - σ_{yy} .

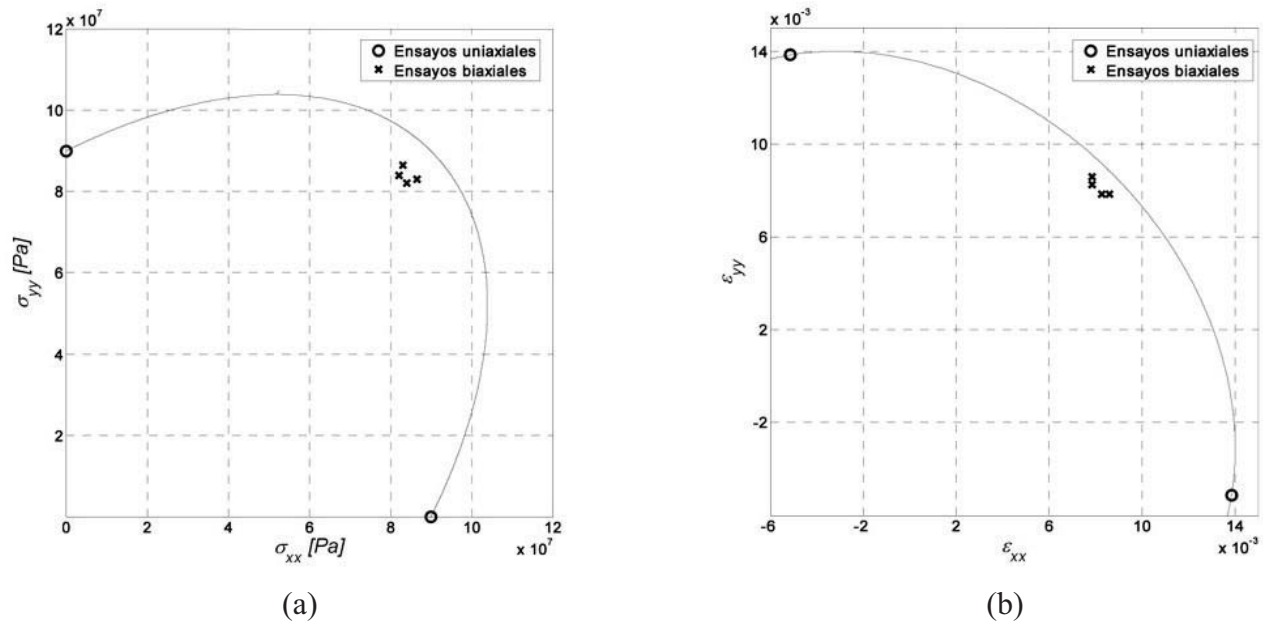


Fig. 13. Curva de fallo biaxial: (a) en términos de tensión; (b) en términos de deformación

5. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de un material compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibra de vidrio aleatoriamente distribuida utilizado en la fabricación de distintas partes de vehículos ferroviarios. Para ello, se han analizado los estados de tensión y deformación en el momento del fallo, desarrollados al realizar ensayos biaxiales en probetas cruciformes fabricadas con dicho material compuesto.

Inicialmente se han llevado a cabo un conjunto de ensayos uniaxiales para caracterizar el material de estudio. Al analizar estos ensayos se ha observado una deformación plástica despreciable antes de la fractura del material, por lo que se ha considerado la tensión de límite elástico igual a la de rotura. También se ha observado un comportamiento elástico lineal del material, además de cuasi-isótropo. Se han alcanzado valores medios de tensión de rotura de 90 MPa , obteniendo un coeficiente de Poisson de aproximadamente 0.37 y un módulo de elasticidad medio de 6.5 GPa .

Tras esta primera etapa uniaxial se ha continuado el estudio realizando ensayos biaxiales, en los que se han conseguido modos de fallo correctos. Se han calculado las tensiones y las deformaciones desarrolladas en la zona central de la probeta cruciforme a partir de galgas extensométricas. Con estos resultados se ha representado la curva de fallo biaxial del material en términos de tensión y de deformación.

Para llevar a cabo el análisis numérico, se ha utilizado un software basado en el método de elementos finitos (MEF), con el que se han simulado los ensayos experimentales realizados para verificar los resultados obtenidos. Al analizar estas simulaciones, se han observado valores coherentes al comparar

los resultados experimentales y los numéricos. Además, en todas las simulaciones realizadas, se ha observado en la zona central de cada modelo que la componente tangencial (τ_{xy}) del vector tensión es mucho menor que las componentes normales (σ_{xx} y σ_{yy}). Por lo tanto, se puede afirmar que se ha conseguido un estado de tensión biaxial definido mediante las tensiones normales del vector de tensión. Esto se debe al diseño de la probeta y a la forma de aplicar la carga, que permiten realizar ensayos biaxiales en las direcciones principales.

Referencias bibliográficas

- [1] Serna Moreno, M. C. y López Cela, J. J. (2011). Failure envelope under biaxial tensile loading for chopped glass-reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*.
- [2] Serna Moreno, M. C. y López Cela, J. J. (2011). Biaxial planar testing of chopped polymer matrix fiberglass reinforced composites in “Proceeding of 16th International Conference on Composite Structures (ICCS16), Porto, Portugal”.
- [3] Wen-Pin, L. y Hsuan-Teh, H. (2002). Parametric Study on the Failure of Fiber-Reinforced Composite Laminates under Biaxial Tensile Load. *Journal of Composite Materials*.
- [4] Smith, W. F. y Hashemi, J. (cuarta edición). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Mc Graw Hill.
- [5] Mangonon, Pat L. (2001. Primera edición). *Ciencia de Materiales. Selección y Diseño*. Prentice Hall.
- [6] Ferrer Giménez, C., Amigó Borrás, V. y Salvador Moya, M. D. *Fundamentos de la Ciencia de los Materiales (Tomo I)*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [7] Smits, A., Ramault, C., Makris, A., Van Hemelrijck, D., Clarke, A., Williamson, C., Gower, M., Shaw, R., Mera, R., Lamkanfi, E. y Van Paepegem, W. (2007). A review of biaxial test methods for composites. *Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures*. Springer Netherlands.
- [8] Smits, A., Van Hemelrijck, D., Philippidis, T. P. y Cardon, A. (2006). Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fibre reinforced composite laminates. *Composites Science and Technology*.
- [9] Gower, M. R. L. y Shaw, R. M. (2010). Towards a planar cruciform specimen for biaxial characterisation of polymer matrix composites. *Applied Mechanics and Materials*.
- [10] Yu, Y., Wan, M. y Xu, X. D. (2002). Design of a cruciform biaxial tensile specimen for limit strain analysis by FEM. *Journal of Materials Processing Technology*.
- [11] Makris, A., Vandenbergh, T., Ramault, C., Van Hemelrijck, D., Lamkanfi, E. y Van Paepegem, W. (2010). Shape optimisation of a biaxially loaded cruciform specimen. *Polymer Testing*.
- [12] ANSYS Users Manual, Version 13. Swanson Analysis Systems, Inc.
- [13] Martínez Vicente, J. L. (2010). Estudio del comportamiento de uniones adhesivas ante distintos estados de carga. Proyecto Final de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Ciudad Real. Universidad de Castilla-La Mancha.

- [14] París Carballo, F., Cañas Delgado, J. y Carlos Marín, J. (2006). Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos. Universidad de Sevilla.
- [15] Cecen, V. y Sarikanat, M. (2008). Experimental characterization of traditional composites manufactured by vacuum-assisted resin-transfer molding. *Journal of Applied Polymer Science*.
- [16] Jones, R. M. (1999). *Mechanics of composite materials*. Taylor & Francis Group.
- [17] Krenchel, H. (1964) *Fibre reinforcement*. Copenhagen: Akademisk Forlag.
- [18] Callister, W. D. (2001. Quinta edición). *Fundamentals of materials science and engineering*. John Wiley & Sons Inc.
- [19] Makris, A., Van Hemelrijck, D., Ramault, C., Zarouchas, D., Lamkanfi, E. y Van Paepegem, W. (2010). An investigation of the mechanical behaviour of carbon epoxy cross ply cruciform specimens under biaxial loading. *Polymer Composites*.
- [20] Welsh, J. S. y Adams, D. F. (2000). Development of an electromechanical triaxial test facility for composite materials. *Experimental Mechanics*.
- [21] Bhatnagar, N., Bhardwaj, R., Selvakumar, P. y Brieu, M. (2007). Development of a biaxial tensile test fixture for reinforced thermoplastic composites. *Polymer Testing*.
- [22] Blanco, E., Oller, S. y Gil, Ll. (2007). *Análisis experimental de estructuras*. CIMNE.
- [23] Serna Moreno, M. C., Martínez Vicente, J. L. y López Cela, J. J. (2012). Stress and strain states of a chopped glass-reinforced composite under biaxial loading in “Proceeding of 15TH European Conference on Composite Materials (ECCM15), Venice, Italy”.
- [24] <http://www.kyowa-ei.co.jp/eng>.
- [25] Planchard, D. C. y Planchard, M. P. (2011). *SolidWorks 2011 Tutorial*. SDC Publications.
- [26] UNE-EN ISO 527-1: Determinación de las propiedades en tracción. Principios generales.
- [27] UNE-EN ISO 527-4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras.
- [28] López Cela, J. J. (1999). *Mecánica de los Medios Continuos*. Ediciones de la UCLM.

Agradecimientos

Este trabajo surge en el marco del Proyecto de Investigación “Estudio experimental y teórico de materiales compuestos reforzados con fibra ante estados de carga biaxiales” (DPI2009-08578), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

La totalidad de los ensayos realizados a lo largo del presente trabajo se han llevado a cabo en el Laboratorio del Área de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras (MMCC) en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), utilizando las máquinas y herramientas propias del Área.

Sistema de inspección de pantógrafos de trenes mediante visión artificial

Inspection system for train pantographs based on computer vision techniques

Ícaro Álvarez Giménez

Grupo de Diseño y Automatización de Sistemas Avanzados, Universidad de Vigo

Resumen

El pantógrafo es la pieza mecánica encargada de adquirir la energía necesaria para alimentar el motor eléctrico de un tren. Actualmente el mantenimiento de los pantógrafos de trenes se realiza de manera manual, siendo necesario cortar la alimentación de la catenaria y que un operario suba al techo del tren. Un pantógrafo en mal estado puede provocar un daño en la infraestructura de la catenaria con el consecuente cese de la circulación de trenes hasta su reparación. Con este proyecto se pretende, mediante técnicas de visión artificial, realizar la inspección del pantógrafo de forma autónoma, rápida y precisa, reduciendo así riesgos, errores humanos, tiempo de mantenimiento y por lo tanto aportando una importante ventaja competitiva.

Palabras clave: Pantógrafo, mantenimiento ferroviario, visión artificial.

Abstract

The pantograph is the mechanism that acquires the energy necessary to power the electric motor of a train. Currently, maintaining of pantograph of trains is performed manually, requiring switch off the catenary power and an operator climbing up to the train. A damaged pantograph could damage the catenary infrastructure and the consequent closure of this route until the repair is done. This projects aims, through computer vision techniques, carrying out the pantograph inspection autonomously, fast and accurate, reducing risks, human error, maintenance time and therefore making a significant competitive advantage.

keywords: Pantograph, train maintenance, computer vision.

1. Introducción y objetivos

El ministerio de Fomento, a través del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte 2005-2020 (PEIT), establece unas directrices específicas para el desarrollo de la política ferroviaria en España, con el objetivo de impulsar el nuevo modelo ferroviario mediante la promoción de la función del ferrocarril en la accesibilidad al conjunto del territorio.

Actualmente la red ferroviaria española de alta velocidad es líder mundial en términos de modernidad y velocidad comercial. En 1992 se realizó el primer viaje comercial de un tren de alta velocidad en España, en la línea Madrid-Sevilla y hoy, 20 años después, hay casi 2900 Km en servicio, que supone la red más extensa de Europa y la segunda del mundo, por detrás de China (Adif, 2012). En el plano tecnológico España es precursora en el sector de I+D+i ferroviario, mediante innovación en infraestructura, señalización, electrificación y material rodante.

El desarrollo de este proyecto viene motivado por la necesidad de los operadores ferroviarios de realizar las tareas de mantenimiento de los vehículos de la manera más óptima posible y de permitir la detección temprana de defectos que puedan suponer un riesgo potencial. Numerosos componentes (ejes, reductoras, deflectores, frenos, pantógrafos, antenas...) deben revisarse periódicamente para garantizar la seguridad de operación de los vehículos. En muchos casos estas operaciones de mantenimiento se realizan varias veces por semana para todas y cada una de las máquinas en circulación.

El pantógrafo

Un pantógrafo ferroviario es un dispositivo encargado de transmitir la energía eléctrica que proporciona la fuerza de tracción a locomotoras, tranvías y otros vehículos con motores eléctricos.

Consiste tal y como se aprecia en la figura 1, en un mecanismo articulado que se encarga de mantener a las pletinas de frotamiento en constante contacto con la línea de alta tensión (catenaria), bajo la que desliza. Se sitúa en el techo de la unidad tractora y es regulable en altura de forma automática.

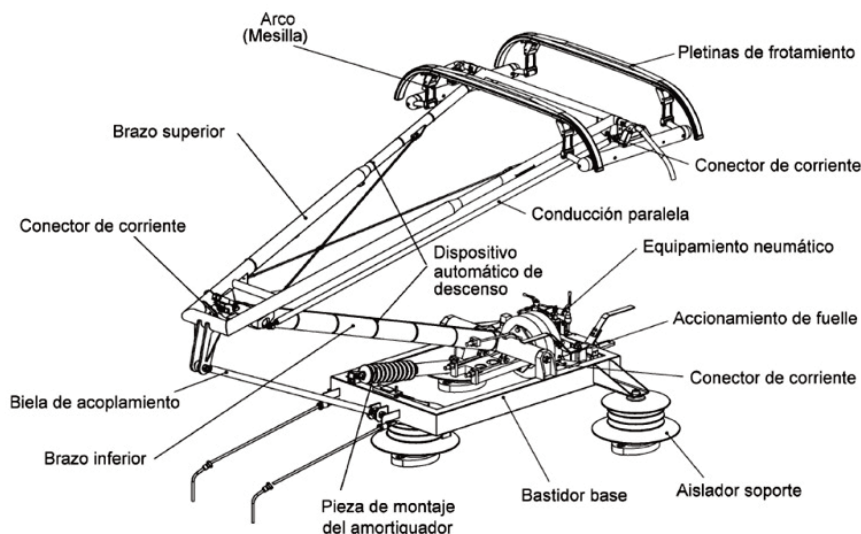


Fig. 1. Esquema general del pantógrafo

El frotador es la parte del pantógrafo que está en contacto con la catenaria. Consta de una pletina de rozamiento, de material variable según el modelo, que es necesario revisar periódicamente debido al constante desgaste por el uso y por la pérdida de material debido a impactos.

El sistema actual de mantenimiento del pantógrafo supone parar el tren por completo, quitar la alimentación a la catenaria y que un operario suba al techo del tren haciendo uso de varios sistemas de seguridad para evitar accidentes. A continuación, el operario realiza una inspección visual de los diferentes elementos de cada pantógrafo y comprueba el nivel de desgaste de las pletinas. La revisión se lleva a cabo cuando el tren ha realizado una cantidad de kilómetros determinada por lo que si se produce un daño importante en el pantógrafo no se detectaría hasta la siguiente revisión.

Un pantógrafo en mal estado, en casos extremos, puede llegar a dañar la infraestructura de la catenaria con la consecuente inutilización de ese tramo de vía hasta que se lleve a cabo su reparación.

Objetivos

Con el presente proyecto se pretende medir el espesor de los frotadores de pantógrafos de trenes de manera autónoma, sustituyendo el actual método de mantenimiento y aportando una ventaja competitiva al reducir el coste, riesgo y errores.

El sistema de inspección debe presentar una fiabilidad elevada y no requerir de mantenimientos complejos y costosos. Además la precisión alcanzada debe cumplir con los requisitos especificados por la norma técnica de mantenimiento de los frotadores a inspeccionar.

La construcción del prototipo debe ser lo más compacta posible para facilitar su instalación y mantenimiento. Los equipos electrónicos deben estar protegidos ante las interferencias electromagnéticas producidas por la catenaria y protegidos de las condiciones ambientales del lugar de instalación.

En aras de la seguridad, el sistema ha de ser suficientemente robusto y disponer de mecanismos de alerta ante fallos y parada de emergencia. Estos mecanismos de emergencia irán convenientemente instalados y sellados en un armario eléctrico instalado a tal efecto.

Para cumplir con los objetivos de autonomía, el sistema debe ser capaz de analizar los pantógrafos de los trenes a su paso por el sistema y generar un informe con los datos relevantes que será enviado a los operarios encargados del mantenimiento para que actúen en caso necesario.

El software encargado de controlar el sistema debe ser configurable para adaptar su funcionamiento a posibles cambios como: el lugar de instalación, el tipo de pantógrafo a analizar, los niveles de alerta fijados, el personal que reciba los informes, etc.

2. Descripción del sistema

La función del sistema de inspección de pantógrafos es obtener una representación tridimensional de su superficie para poder medir el espesor del material de desgaste y detectar posibles defectos de

manera autónoma. Se opta por el uso de técnicas de visión artificial ya que permiten obtener una reconstrucción fiable y precisa de la superficie del frotador con un coste razonable.

Iluminación estructurada

La visión artificial se define como el campo de la Inteligencia Artificial que permite la obtención de información especial obtenida a través de imágenes digitales. En aplicaciones industriales, las técnicas de visión artificial se usan para mejorar la calidad, aumentar la producción y reducir costes.

La visión artificial tridimensional es la parte de la visión artificial que se centra en obtener las propiedades tridimensionales de un objeto a partir de una o varias imágenes de dicho objeto tomadas desde una o varias cámaras.

Una de las técnicas usadas en visión artificial tridimensional se denomina iluminación estructurada y consiste en proyectar un patrón de luz en un objeto y captar la deformación de dicho patrón mediante un sistema de adquisición, normalmente una cámara. En la figura 2 se muestra el principio de funcionamiento; el patrón de luz es generado por un iluminador láser que incide sobre la superficie del objeto y genera un perfil que es captado por el sensor de imagen de una cámara digital.

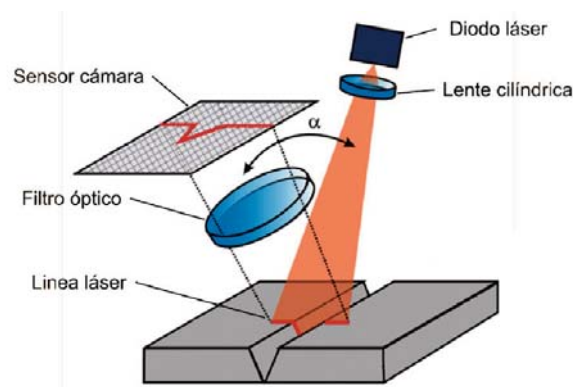


Fig. 2. Principio de funcionamiento de los sistemas de visión artificial basados en iluminación estructurada

Para cada punto del perfil se calcula, mediante triangulación (Kumar, 2006) la posición que ocupa en el espacio. Tomando un número suficiente de perfiles repartidos por la superficie del objeto, se obtiene una reconstrucción tridimensional, como puede observarse en la figura 3.

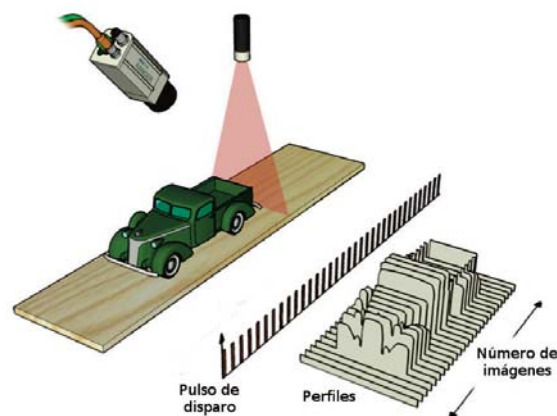


Fig. 3. Reconstrucción tridimensional de la escena mediante la técnica de iluminación estructurada

Hardware

Para llevar a cabo la técnica explicada en el apartado anterior es necesario la instalación de un sistema de iluminación láser que incida en la superficie de los frotadores, un dispositivo de adquisición que registre dichas proyecciones y un mecanismo de detección de pantógrafo para activar y desactivar la cámara y los iluminadores a su paso por el prototipo.

Las imágenes adquiridas se enviarán a un PC donde se realizará su análisis mediante los distintos algoritmos de visión artificial realizados para extraer la información necesaria que permita obtener la medida de espesor de dicho frotador y analizar los posibles defectos.

Para satisfacer los requisitos descritos se diseña una arquitectura como la que se puede observar en la figura 4. El conjunto de línea es la parte del sistema que se instala sobre la catenaria y en él se sitúa la cámara, los sensores de proximidad y los iluminadores láser. En el armario de techo se sitúan todos los dispositivos de alimentación y de comunicación que nos permiten solicitar imágenes a la cámara y activar los iluminadores cuando sea necesario. En el armario de suelo se instala el PC que ejecuta el software que permite controlar todo el sistema y también enviar todos los datos almacenados al exterior.

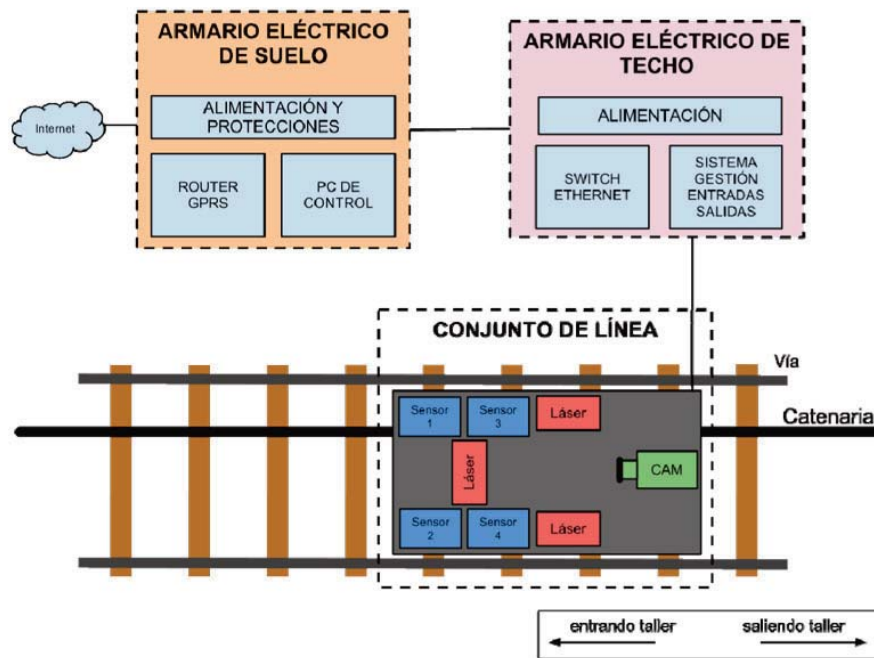


Fig. 4. Arquitectura del sistema

Software de explotación del sistema

El software que se ejecuta en el PC de control tiene como función comunicarse con los sensores de presencia para detectar la llegada de un tren, activar los iluminadores y la cámara, obtener imágenes de los iluminadores láser proyectados en la superficie de dicho pantógrafo, analizar dichas imágenes para extraer la medida de espesor del frotador y finalmente enviar toda la información al exterior para que pueda ser consultada por el personal interesado.

Para realizar las tareas descritas, el software desarrollado se estructura en tres módulos:

- 1- La *Máquina de estados* monitoriza la detección de los sensores de presencia de pantógrafo y activa la iluminación láser y adquisición de imágenes en caso de que un tren pase por el sistema. Posteriormente recibe las imágenes adquiridas y las envía al siguiente módulo para que las analice.
- 2- El módulo de *Procesamiento de imágenes* ejecuta los algoritmos de visión artificial que permiten extraer la información relevante que nos indica el espesor del material de desgaste así como los diferentes problemas detectados.
- 3- El módulo de *Generación de informe* recibe la información del estado de los pantógrafos de un tren y genera un informe con los datos de cada inspección: fecha y hora, velocidad y sentido del tren, espesor de los frotadores detectados, ángulos de desviación de los pantógrafos, pérdidas de material y uniformidad en el desgaste.

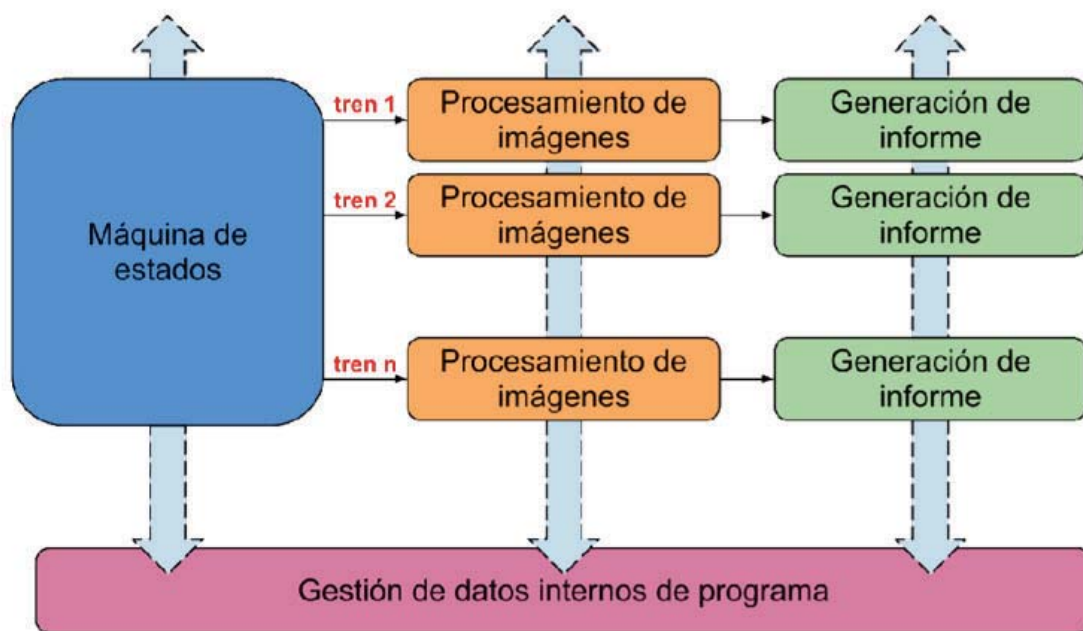


Fig. 5. Arquitectura del software de explotación del sistema

Los informes generados por el sistema se envían a una base de datos, que puede ser consultada por los operarios desde sus ordenadores personales y se envía un email con un resumen del informe como el que se puede ver en la figura 6. Los perfiles muestran las cotas más bajas del espesor de los frotadores detectados en cada pantógrafo. También se muestran datos de desgaste, cota mínima, superficie total con impactos, inclinación lateral de las mesillas y uniformidad en el desgaste. En caso de existir un problema grave se activa una alarma para proceder a la sustitución del pantógrafo en cuestión.

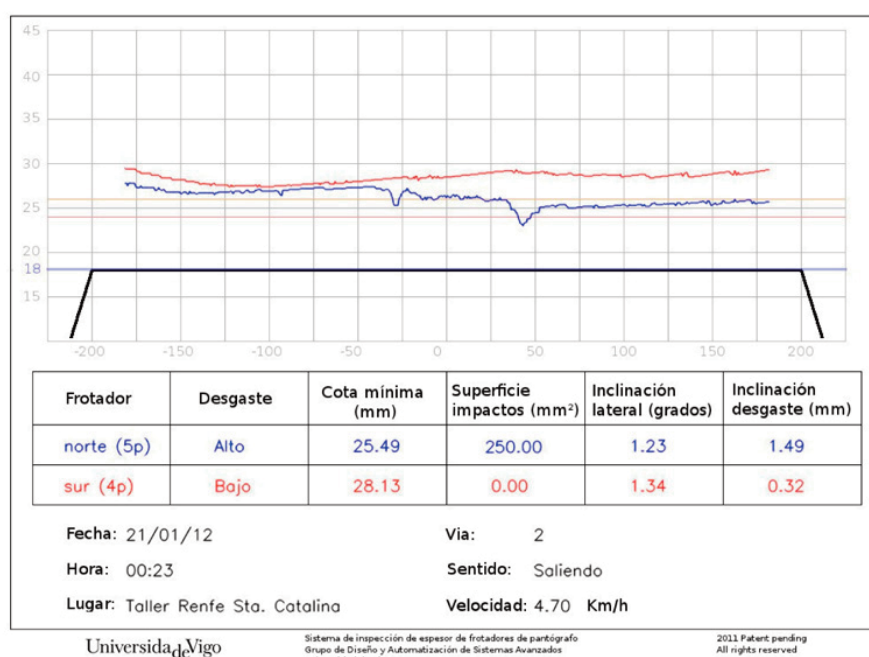


Fig. 6. Gráfica enviada por correo electrónico a los usuarios del sistema cuando se detecta un tren a su paso

Algoritmos de visión artificial

Como se explicó en la sección 2.1, para realizar la reconstrucción tridimensional de la escena se usa la técnica de iluminación estructurada, que consiste en proyectar un haz láser sobre la superficie del objeto con el propósito de localizar dicha proyección en la imagen y calcular su posición mediante triangulación. Los algoritmos desarrollados permiten distinguir la proyección de las líneas láser entre todas las interferencias recibidas por la cámara (ruidos, reflejos). Una vez localizadas las líneas se reduce su grosor para obtener la posición exacta en la imagen y por último se calcula el valor en coordenadas del mundo real.

Las medidas obtenidas de la superficie son relativas a la cámara, pero para saber el espesor real del frotador es necesario localizar el plano inferior del frotador para tomarlo como plano de referencia de cota cero. Por este motivo se sitúan dos iluminadores láser auxiliares que proyectan líneas verticales en los laterales del frotador y nos permiten situar la posición de dicho plano en la imagen, tal y se puede ver en la figura 7.

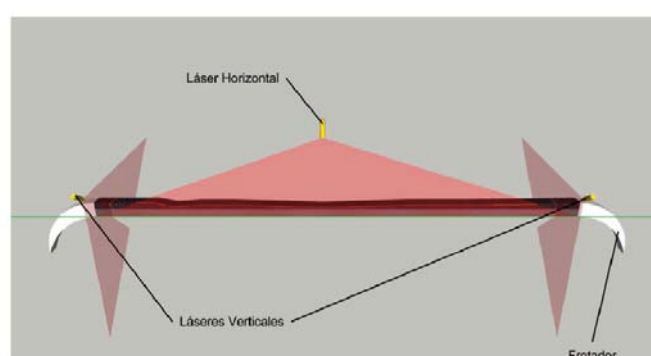


Fig. 7. Disposición de los iluminadores láser en el sistema

En la figura 8 se pueden observar como se usan técnicas de búsqueda de patrones (Brunelli, 2009) para situar las proyecciones de los láser verticales, en primer lugar, y a continuación se segmenta esa zona de la imagen para separar exactamente la parte perteneciente al haz láser del resto. Por último se busca la cota inferior de ambos láser que se corresponderá con la posición del plano inferior del frotador en la imagen.

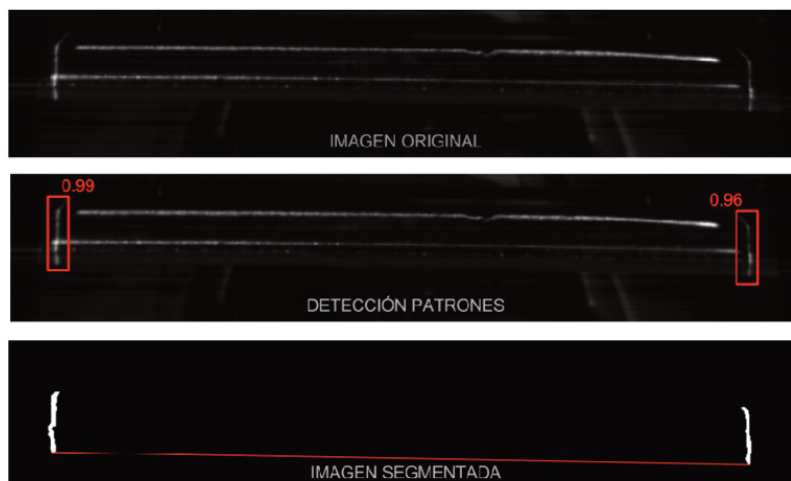


Fig. 8. Localización de las proyecciones láser verticales y cota cero

El siguiente paso consiste en localizar la proyección del láser horizontal, que incide sobre la superficie del frotador y adelgazar dicha línea para obtener la posición exacta en la imagen. En la figura 9 se puede observar los pasos necesarios para localizar dicha proyección: en primer lugar se segmenta la imagen central buscando islas horizontales de puntos con iluminación semejante. Como resultado de este primer paso aparecen varios candidatos entre los cuales solo una de las islas pertenece a la línea buscada y el resto a ruidos y reflejos, que son filtrados en el último paso.

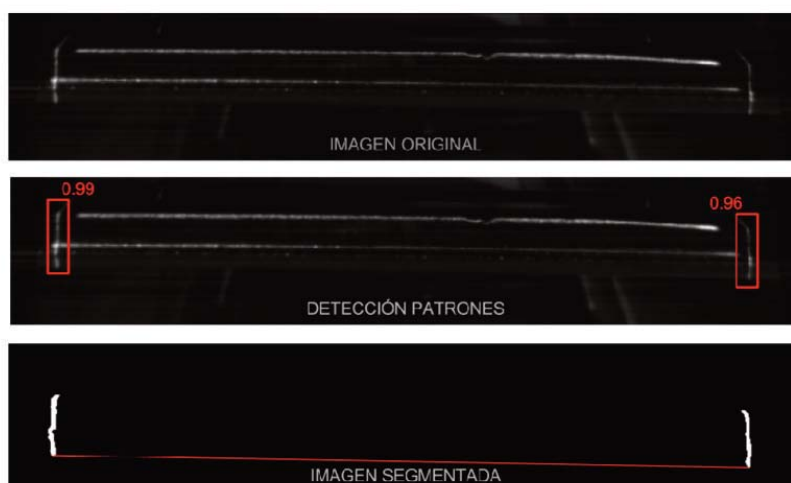


Fig. 9. Localización de proyección láser horizontal

Una vez localizada la zona donde se encuentra la proyección horizontal se adelgaza esta línea mediante técnicas de cálculo del centro de gravedad para obtener en cada columna de la imagen una posición exacta de la altura del frotador en ese punto. Comparando esa posición con la cota cero obtenemos un perfil con una precisión submilimétrica que nos indica el espesor del frotador en cada imagen.

Una vez obtenidos los perfiles en todas las imágenes se fusiona dicha información para obtener una representación tridimensional de la superficie del frotador y finalmente se busca en ella impactos graves o desgastes excesivos o irregulares.

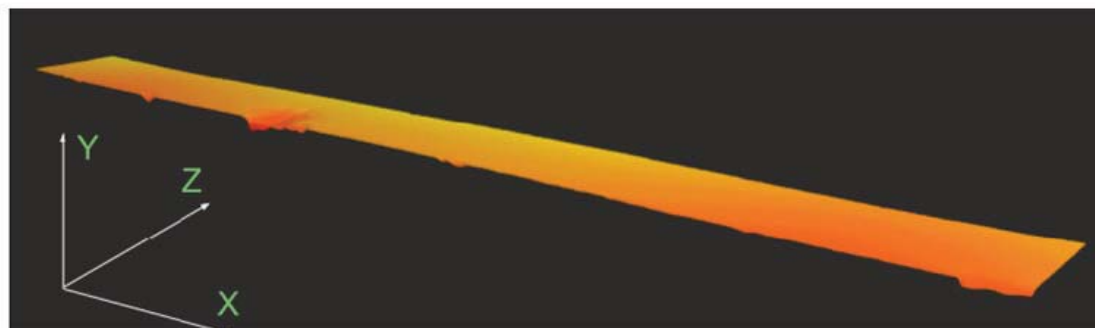


Fig. 10. Representación tridimensional de la superficie del frotador

Para implementar los algoritmos de visión artificial que realizan las funciones aquí descritas se han utilizado distintas técnicas de búsqueda de patrones, segmentación de la imagen, cálculo del centro de gravedad de la curva de intensidad, operaciones morfológicas, filtrado, etc. que están disponibles en la biblioteca de libre distribución OpenCV (Open SourceComputerVision), actualmente gestionada por el laboratorio de investigación robótica WillowGarage (Bradski, 2008).

3. Conclusiones

En el presente proyecto se ha desarrollado un sistema autónomo de inspección de pantógrafos de tren en tiempo real basado en técnicas de visión artificial. El sistema realiza la medición del espesor del frotador mediante triangulación láser, obteniéndose los niveles de desgaste del frotador con precisión submilimétrica, detecta pérdidas de material producidos por impactos y comprueba que las pletinas del pantógrafos estén correctamente alineadas.

La construcción del prototipo se ha realizado lo más compacta posible y de manera que respete todos los gálibos impuestos en el lugar de instalación. Se han protegido los dispositivos electrónicos contra las interferencias electromagnéticas provocadas por la catenaria y contra posibles arcos voltaicos. Para asegurar que el sistema sea lo más flexible posible se ha procurado basarse en estándares abiertos, tanto en la parte hardware como en el software.

Con toda la información recogida por el sistema al paso de cada tren se genera y envía un informe que permite al personal de mantenimiento revisar la integridad de los frotadores sin tener que acceder al techo del tren, reduciendo el riesgo de accidente y el tiempo necesario para realizar esta tarea de forma manual. En este sentido con el sistema desarrollado en este proyecto se consigue una gran ventaja competitiva en las tareas de mantenimiento de trenes eléctricos, obteniéndose una operación más precisa y reduciendo coste, riegos y errores; a mayores, se incrementa la frecuencia de inspección con respecto a los métodos usados anteriormente y por lo tanto permite detectar con mayor eficacia averías importantes que supongan un peligro potencial para la infraestructura de la catenaria.

El sistema desarrollado ha sido instalado y puesto en marcha en un taller de mantenimiento de ferrocarriles de alta velocidad y lleva en funcionamiento mas de un año. En este periodo se han recogido muestras de casi 1000 trenes a su paso por el sistema y se han obtenido los resultados buscados. La precisión final obtenida en las medidas es de 0,65 milímetros.

4. Referencias

- [1] Adif (2012). Alta velocidad Española. <http://www.adif.es/lineas_de_alta_velocidad.shtml>
- [2] Brunelli, R. (2009). *TemplateMatchingTechniques in ComputerVision:Theory and Practice*. Wiley.
- [3] Kumar, S. (2006). Anopticaltriangulationmethodfor non-contactprofilemeasurement. *IEEE International Conferenceon Industrial Technology*, 2006.
- [4] Bradski, G. (2008). *ComputerVisionwiththeOpenCV Library*. OReilly.

Sistema de prueba de freno en estaciones de clasificación de vagones de mercancías

Brake test unit for marshalling yard of freight wagons

Sergio Granda Torres

Master Universitario en Sistemas Ferroviarios
Universidad Pontificia Comillas (ICAI)

Resumen

El objetivo de este artículo es el desarrollo de un sistema de prueba de freno en estaciones de clasificación de vagones de mercancías (ECVM). Se ha desarrollado un sistema que puede ir acoplado en paralelo al sistema de freno de cualquier locomotora con un automatismo para la ejecución del ensayo, con el que un único operario o el propio maquinista, mediante una Unidad Móvil Portátil, puede actuar sobre el mando de freno de la locomotora de manera remota y al mismo tiempo revisar las distintas fases de control de fugas, apretado y aflojado del freno cuando recorre la composición de vagones acoplada.

Palabras clave: Trenes de mercancías, freno, estaciones de clasificación, prueba de freno.

Abstract

The aim of this paper is to provide the development of a brake testing system in marshalling of freight wagons. A new system has been developed, which can be coupled in parallel to the brake system of any locomotive with a control system in order to perform the assay.

Therefore, a single operator or the train driver himself, with the help of a portable mobile unit may act on the knob locomotive brake remotely while reviewing the various leak phases such as: fastening and loosening the brake as it travels the composition of coupled wagons.

keywords: Freight wagons, brake, marshalling yard, brake test.

1. Principio de funcionamiento de freno de tren.

En la actualidad, las locomotoras suelen equipar dos tipos de frenos: Freno directo y Freno indirecto.

1.1. Freno directo.

Es el freno neumático más sencillo accionado desde una posición para todo el tren. Mediante un conducto continuo de aire (tubería de freno directo) se alimenta directamente a los cilindros de freno de cada uno de los vehículos de la composición. Sus principales **inconvenientes** en composición son:

- Es irregular en la estructura de la fuerza de frenado (no uniforme) y actúa de forma muy lenta en el final del tren.
- No cumple con los requisitos exigidos a un freno en composición, es decir, no es un freno automático, en caso de rotura de la manga de unión entre vehículos la composición se queda sin freno. Por otro lado no cuenta con una eventual reserva de aire para el frenado.

Actualmente el freno directo se utiliza en locomotoras y vehículos tractores a nivel local como freno alternativo al automático (como sistema adicional de seguridad) y sólo cuando el vehículo circula sin composición acoplada.

1.2. Freno indirecto

Las composiciones de vagones de mercancías van equipadas con un freno indirecto. En Europa el funcionamiento de estos frenos está regulado por la UIC “*Union Internationale de Chemin de Fer*”. Todos los vagones están comunicados neumáticamente mediante la Tubería de Freno Automático (TFA). Cuando la presión en la TFA corresponde a 5 bar el freno está aflojado es decir 0 bar en los cilindros de freno. El máximo esfuerzo de frenado se consigue cuando se baja la TFA 1,5 bar, es decir hasta un valor de 3,5 bar. El freno automático significa una considerable mejora respecto a los frenos directos:

- Es un freno de aire continuo y el freno se acciona desde una posición para todo el tren.
- Acción automática, en caso de corte de tren se frena automáticamente la composición.

La fuerza del freno en cilindros se produce por aire a presión (aire comprimido). El aire tiene dos funciones:

1. Producir una fuerza (a través de los cilindros de freno)
2. Transmitir una señal (a través de la tubería que recorre el tren)

2. Estaciones de clasificación de vagones de mercancías.

En una red ferroviaria donde el número de estaciones es muy elevado existe una gran cantidad de posibles combinaciones que pueden darse entre los puntos origen y destino de los vagones. Las Administraciones Ferroviarias intentaron dar solución a esta problemática creando las llamadas “estaciones de clasificación”, encargadas de centralizar y organizar las facturaciones de todas las estaciones situadas en su área de influencia.



Figura 1. Esquema de estación de clasificación de mercancías.

La operativa de las estaciones de clasificación es la siguiente:

1. Todos los trenes que llegan a la estación de clasificación desde los distintos orígenes de su área de influencia son estacionados en un haz de recepción. Allí se libera la locomotora, se desenganchan los vagones y se dejan “no frenados”.
2. Para pasar el tren al haz de clasificación se sitúa un tractor de maniobras en cola de tren y empujando hacia el llamado “lomo de asno”, se posibilita el que cada uno de sus vagones sea encaminado a la vía correspondiente de la estación de clasificación del área de influencia de su destino.
3. Los vagones de distintos trenes de llegada van estacionándose en las correspondientes vías de ese haz, pero para que puedan constituir un tren hay que unirlos, con gancho de acoplamiento y tubería de freno, y limitar su longitud y masa a la capacidad de la locomotora que lo vaya a remolcar y a los condicionantes de las estaciones de la línea por la que vaya a circular.
4. Adecuados los extremos, el tren, ya formado, se pasa con un tractor de maniobras al haz de expedición, donde espera a la hora de salida, el acoplamiento de la locomotora que lo va a remolcar hasta destino.

3. Ensayo de Freno.

Los vagones poseen un freno puramente neumático, y es muy importante que una vez que el tren este formado, se realice una prueba de freno para verificar la seguridad del tren completo antes de salir de la estación de clasificación. Por otro lado hay que calcular la capacidad de frenado de la composición (porcentajes de frenado). También es necesario comprobar que la TFA esté conectada correctamente a través de todo el tren entre los diferentes vehículos. Y por último el funcionamiento del sistema de freno de cada uno de los vagones.

Si no se realizan estas comprobaciones se corre el riesgo de que algunos vagones de la composición, estén frenados o su freno este estropeado. Si están frenados, la locomotora tiene suficiente potencia para arrástralos y en consecuencia se crearían planos en las ruedas y un desgaste muy grande en estas, también podrían saltar chispas, que llegarían a campos o pastos provocando incendios. Si los vagones están aflojados, puede que cuando se demande freno a toda la composición, estos vagones no frenen y no haya suficiente capacidad de frenado para las prestaciones previstas en la composición, con lo que en el peor de los casos podría dar lugar a un gran accidente.

El proceso de prueba de freno sigue el siguiente diagrama presión en TFA-tiempo:

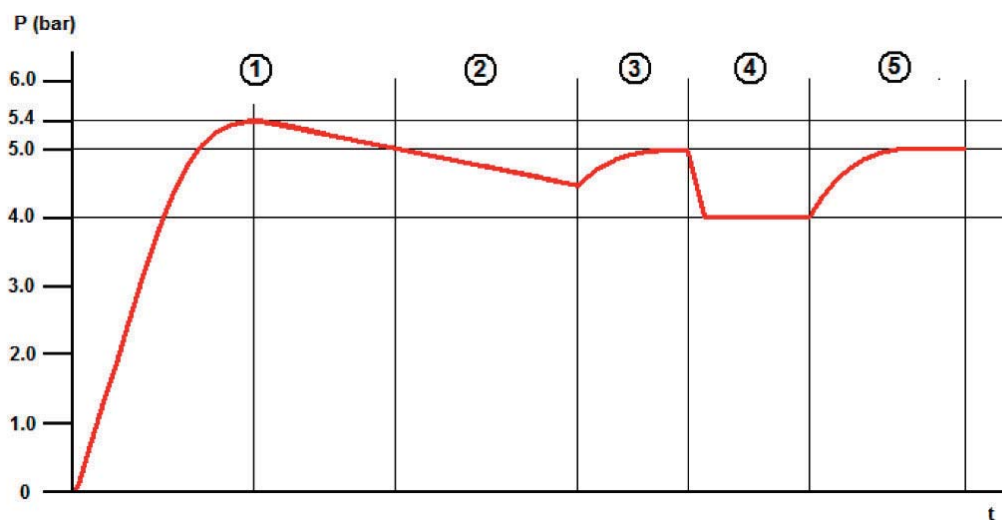


Figura 2. Proceso de Prueba. Presión en TFA - Tiempo

Y se divide en 5 partes:

1. Sobrecarga. Se llena el tren con aire comprimido (con un proceso de ecualización adicional 5,4 – 5 bar). Esto se realiza para asegurar que los distribuidores de la composición dispongan de la misma presión de referencia de freno.

2. Comprobación de fugas, después de un minuto desde que se aísla el sistema, el valor mínimo de la presión en TFA debe ser superior a 4,5 bar. (0.5 bar/min).

3. Rellenado del sistema, para alimentar las posibles fugas que hayan podido producirse.

4. Reducción de la presión en la TFA para apretar los frenos y comprobar si se han apretado todos los frenos de la composición.

5. Aumento de la presión en la TFA para aflojar los frenos y comprobar si se han aflojado todos los frenos de la composición.

4. Unidades de ensayo de freno actuales.

Actualmente el proceso de Prueba de Freno, se puede realizar de dos formas:

4.1. Unidades de ensayos de frenos en parada UEFP (Sistema más extendido en Europa).

El sistema se basa en que un operario conecta un sistema estático de ensayo de frenos a la Tubería de Freno Automático (TFA) de la composición y el mismo operario mediante una Unidad Móvil Portátil, actúa sobre la UEFP y realiza el ensayo de freno para comprobar la funcionalidad de los frenos, recorriendo la composición en uno y en otro sentido.

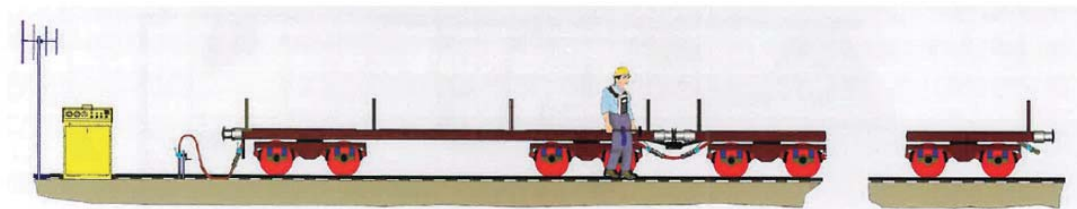


Figura 3. Ensayo de Freno con Unidad de Ensayos

Ventajas	Inconvenientes
- Solo necesario un operario. - No necesaria la locomotora. - Flexible	- Alto coste de infraestructura y Gran cantidad de unidades en diversos puntos de la estación de clasificación. - Es necesario un sistema centralizado de producción y tratamiento de aire comprimido para alimentar a las distintas unidades.

4.2. Con Locomotora (Sistema Utilizado en España).

La composición de vagones se acopla a la locomotora, y se conecta la TFA. En este sistema es necesario dos personas: el maquinista el cual actúa sobre el freno, mientras que a lo largo de la vía un operario revisa si se aflojan o se aprietan los frenos. Los dos mantienen comunicación mediante un walkie talkie.

Es un sistema sencillo y totalmente manual, en el que no es necesario ningún sistema adicional. El inconveniente principal es que en el momento del ensayo, ni el maquinista ni la locomotora están operativos para otros trabajos y son necesarias dos personas.

5. Sistema de ensayo en composiciones.

Para llegar al diseño definitivo del nuevo sistema es necesario primero analizar las diferentes seguridades que posee la locomotora para elegir el lugar adecuado donde se instalara el dispositivo. Sera necesario analizar los diferentes circuitos que componen el nuevo sistema y por ultimo incorporarle una serie de elementos de supervisión.

5.1. Seguridades de la locomotora

En una locomotora que es un vehículo que puede circular aislado, por seguridad se necesitan dos tipos de frenos diferentes: freno directo de locomotora y freno indirecto. Cuando la locomotora va sola utiliza el freno directo, aunque también podría utilizar el indirecto, pero el tiempo de aflojamiento cuando se utiliza el freno directo es de 6 a 8 s. Por el contrario cuando se utiliza freno indirecto los tiempos de aflojamiento oscilan de 15 a 20 s, por tanto se suele utilizar el freno directo ya que es más rápido en su ejecución. Cuando va en composición el freno directo no se puede utilizar, porque solo se frenaría la locomotora, y no la composición entera acoplada. La locomotora también integra ciertos sistemas de seguridad conectados a la TFA:

- **Seta de Maquinista:** se trata de un dispositivo manual situado en la consola de mando de la locomotora, el cual es accionado mediante un golpe seco sobre un pulsador. En el momento en el que se pulsa la seta se pone en contacto la tubería de freno automático con la atmosfera mediante una gran sección de paso, provocando una rápida caída de presión de la TFA y en consecuencia una aplicación de los frenos.
- **SIFA:** se trata de un dispositivo compuesto por una válvula de vigilancia autopilotada por la propia presión de TFA a través de un paso calibrado y que por desexcitación de una electroválvula evacua la presión de pilotaje provocando la apertura de la TFA a la atmósfera a través de una gran sección de paso. Es un dispositivo que cuelga directamente del hilo de lazo de emergencia y cualquier incidencia o actuación sobre dicho lazo de seguridad provoca su actuación. Integra además un dispositivo de aislamiento con contactos eléctricos para indicación de estado.

5.3. Sistema de ensayo.

Si observamos la *figura 5* podemos apreciar los diferentes circuitos que componen el dispositivo:

Circuito de Potencia Neumática

- Válvula de pistón posición .01, la cual permanecerá cerrada cuando no tenga presión en el pilotaje y por tanto aislara el sistema de prueba de freno. Controlada por la misma presión de pilotaje se encuentra la válvula de pistón posición .08, la cual permanecerá abierta cuando no tenga presión el pilotaje, y por tanto cuando el sistema de ensayo no este activo permitirá el paso a la TFA del aire procedente de la válvula de freno indirecto de conductor.
- Válvula de pistón posición .04, pilotada externamente y cuya función será la de cerrar o abrir el paso de aire procedente de la valvula Relé.
- Válvula Relé posición .05, cuya función será la de generar la misma presión amplificada en caudal que llegue a la válvula por la entrada Cv procedente del circuito de mando, para ello cogerá aire de la boca R, la cual procede de la válvula de freno indirecto de conductor. Si existe una sobrepresión en TFA respecto a la presión Cv será eliminada por la salida 0. El aire a presión saldrá de la válvula relé por el puerto C.
- Transductor posición .06, este elemento transformará presión de entrada en una corriente de salida entre 4 y 20 mA, la cual será registrada y valorada por la microelectrónica del sistema. Con este transductor se conocerá la presión que se envía a la TFA de la composición.

Circuito de Control

Electroválvula posición .02 para el pilotaje de las válvulas de émbolo .01 y .08. Electroválvula posición .03 para el pilotaje de la válvula de émbolo .04.

5.4. Mando de freno del sistema

Para el circuito de mando se proponen dos tipos de circuitos con diferentes elementos y funcionamiento.

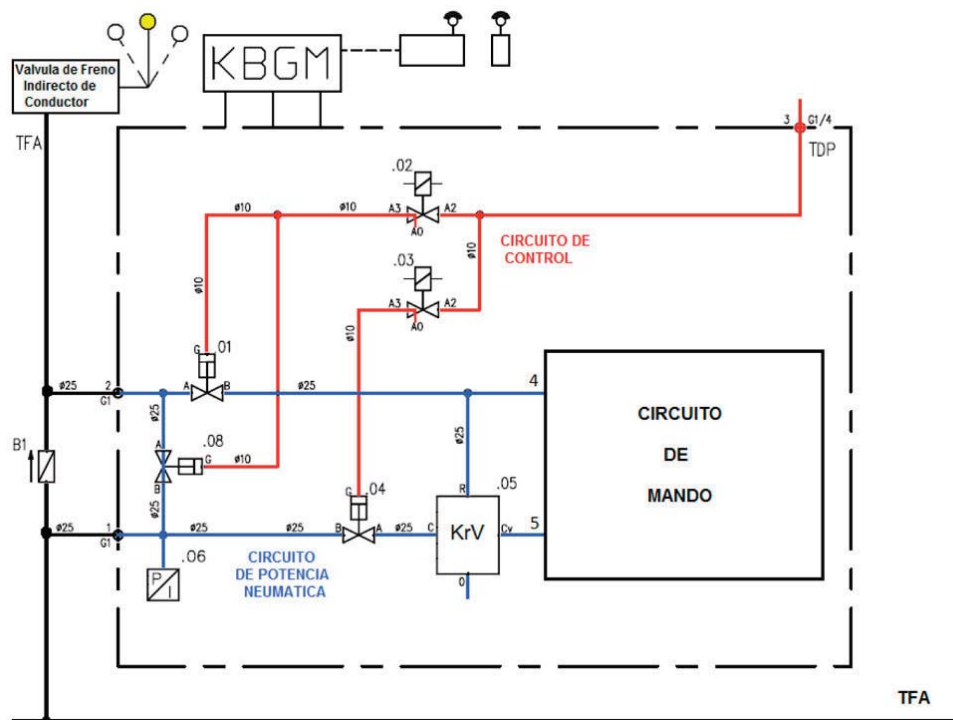


Figura 5. Diferentes circuitos que componen el sistema de ensayos.

Opción 1

El circuito estará formado por una electroválvula posición .14 la cual pilotará las válvulas de pistón posición .15 y .16. Al igual que en la opción 2 al circuito de mando le llegará aire desde la válvula de freno indirecto de conductor por la entrada 4. En este caso el aire se dividirá en dos caminos, uno hacia la electroválvula .14 y otro a la válvula de embolo .15.

La válvula de émbolo .15 sin presión de pilotaje deja pasar el aire entre A2 y A3 comunicando el aire procedente de la válvula de freno indirecto de conductor hacia la entrada Cv de la válvula relé. La electroválvula .14 al energizarse abre el paso del aire A2-A3 hacia el pilotaje de la válvula .15 la cual cambia de estado comunicando el paso A1-A2 para posibilitar las funciones de primer escalón de freno mínimo y escalón de freno de servicio. Al mismo tiempo al energizarse la electroválvula .14 comanda la válvula de embolo .16 que abre el paso del aire A2-A3 hacia el depósito de primer escalón .18 produciendo una bajada rápida por igualación de presiones con el depósito .12. La reductora de presión .17 está ajustada a la presión correspondiente al escalón de freno de servicio y se alimenta con aire procedente de la válvula de freno indirecto de conductor.

Este sistema es más complejo neumáticamente pero la lógica al ser cableada hace que el sistema a nivel global sea más sencillo y cumpla con niveles de seguridad más elevados.

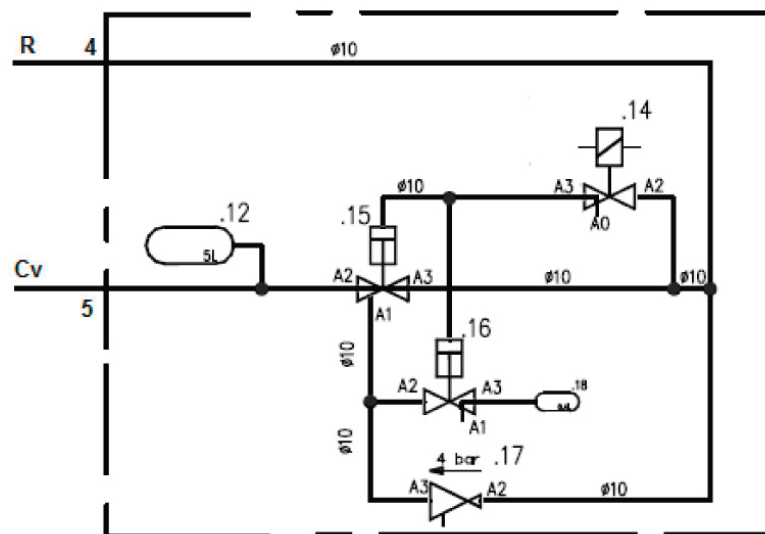


Figura 6. Esquema de Opción 1 del Mando de Sistema.

Opción 2

Al circuito de mando le llegará aire desde la válvula de freno indirecto de Conductor por la entrada 4. El aire fluirá por el circuito y será gestionado por las electroválvulas posición .13 y .14. El control de estas electroválvulas será realizado por la microelectrónica del sistema que dependiendo de la etapa de ensayo en la que se encuentre y la medida registrada por el transductor posición .15 actuará sobre las electroválvulas para trasladar a la salida Cv el valor de presión objetivo. El circuito dispone de dos depósitos de aire uno de volumen pequeño y otro de gran volumen, para que no se produzcan inestabilidades de funcionamiento cuando se cierre el bucle de control a través del transductor de presión. También dispone de una salida a la atmosfera con un paso calibrado (salida 0) y las conexiones se realizarán mediante una tubería de 10 mm de diámetro.

Este sistema es muy versátil y requiere una programación previa, aunque es un sistema más caro y complejo.

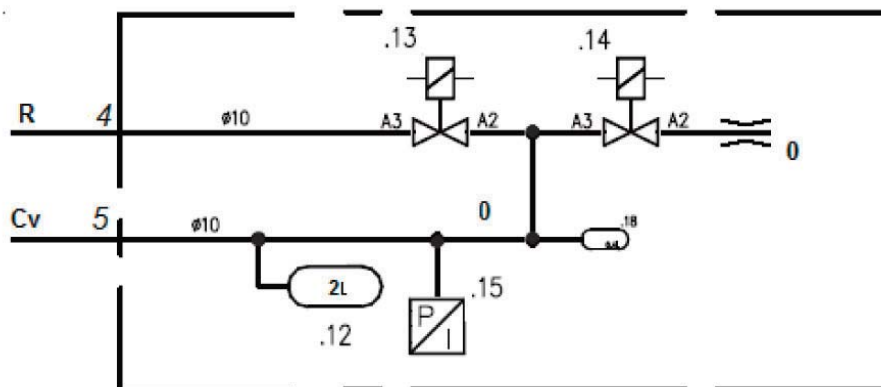


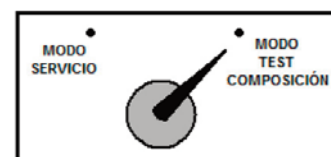
Figura 7. Esquema de Opción 2 del Mando de Sistema.

Para explicar la funcionalidad del sistema completo se ha seleccionado la opción 1.

5.5. Análisis de seguridad del dispositivo.

- En los laterales de la locomotora será necesario instalar válvulas de accionamiento manual para provocar el frenado de emergencia como elementos adicionales de seguridad, posición B2/1 y B2/2 correspondientes a cada lateral. Al actuar manualmente sobre ellas se pondrá la TFA en contacto con la atmosfera a través de una gran sección de paso. Estas válvulas se instalaran para que ante cualquier incidencia que ponga en riesgo la seguridad puedan actuarse sin necesidad de subir a la locomotora evacuando la presión de la TFA a la atmósfera.

- Dentro de la cabina se instalará un conmutador selector de tipo eléctrico con un testigo luminoso que indicará si se encuentra en “Modo Servicio” o “Modo Test Composición”. Cuando se mueva el conmutador a la posición “Modo Test Composición” se habilitará la electrónica del sistema de mando y ésta activará las Electroválvulas .02 y .03.



Normalmente el corte de tracción se realiza mediante un presostato que cuelga de la tubería de freno automático, de tal manera que cuando cae la TFA por debajo de 4,5 bar se corta tracción, y no se vuelve a permitir tracción hasta que no sube a 4,7 bar, es decir, cuando el freno se encuentra prácticamente aflojado. Esta señal se coloca en serie con un contacto libre de potencial de la electrónica del sistema de prueba de freno (KBGM), de tal manera que o bien corta la tracción el presostato que cuelga de TFA o bien cuando el conmutador selector está en “modo test composición” la electrónica abre dicho contacto inhibiendo la tracción. Con esta medida se evita que el tren pueda salir con tracción, con el sistema de prueba de composiciones conectado.

- La electroválvula de impulsos posición .11 cuya misión es el aislamiento remoto de forma segura del sistema de prueba. Si mientras se realiza el ensayo sucede alguna circunstancia peligrosa o el sistema funciona de manera defectuosa se podrá actuar sobre la electroválvula de impulsos para que aisle el sistema.

También se incluirá para mayor seguridad del sistema de prueba de composiciones una válvula de emergencia SIFA posición .18. Si por cualquier circunstancia, y aun sabiendo que la prueba se realizará en un lugar llano y con el tren inmovilizado mecánicamente, la composición comienza a moverse y los pulsadores de locomotora situados en los laterales están lejos, se podrá actuar sobre control remoto, el cual enviará una señal a la electrónica del sistema para que desexcite la electroválvula de la SIFA, que evacua la presión provocando la apertura de la TFA a la atmosfera a través de una gran sección de paso.

DIAGNOSIS IMPLEMENTADA EN EL SISTEMA

- Para verificar si una vez activada cada una de las electroválvulas, llega presión a la tubería para el pilotaje de las correspondientes válvulas de émbolo, se colocará una serie de presostatos posición .09, .10, .13 y .19. Cuando la presión de las tuberías baje de 2.8 bar el presostato abrirá el contacto enviando un valor 0 a la electrónica y cuando suba de 3.2 bar cerrará el contacto

enviando un 1, de este modo cada vez que se actúe sobre una electroválvula se podrá diagnosticar si la orden ha sido ejecutada correctamente o por el contrario se ha producido una anomalía de funcionamiento en el sistema.

- El transductor .06 también permite realizar una diagnosis en tiempo real de las diferentes fases del test.

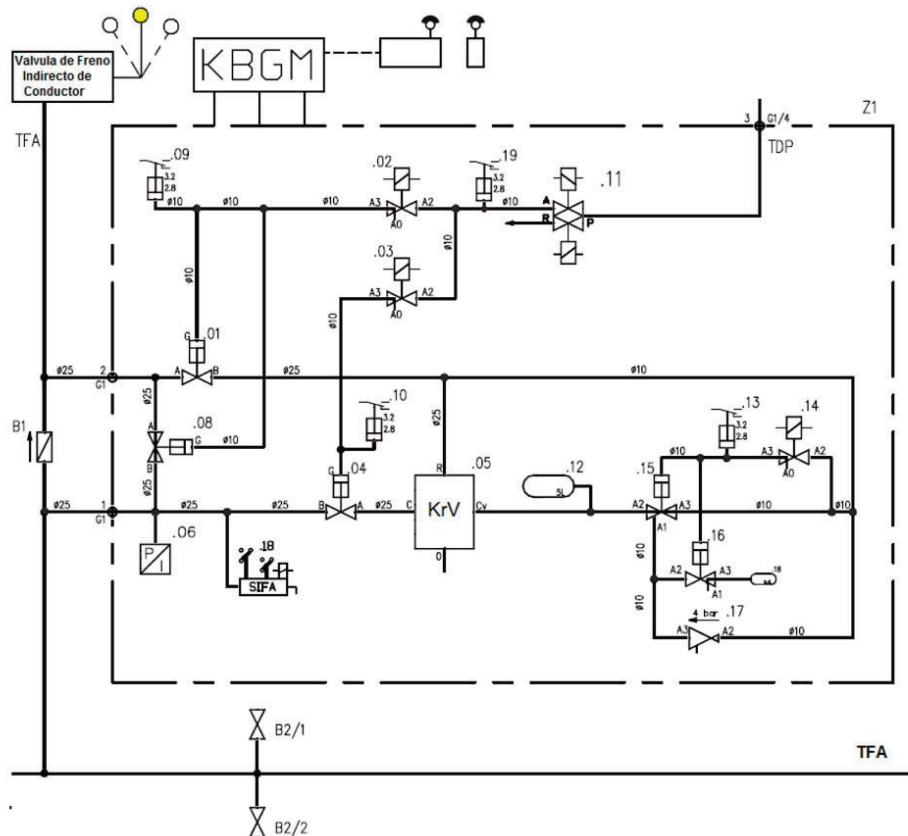


Figura 8. Esquema neumático del sistema de prueba de freno.

5.6. Automatización del proceso y funcionamiento.

Tras acoplar la composición de vagones a la locomotora e inmovilizar mecánicamente la composición se procede a aflojamiento completo del freno de la composición situando la válvula de freno de conductor de la locomotora en posición de “marcha”. A continuación se realiza la función de sobrecarga que se realiza en dos fases: primero actuando sobre el pulsador de sobrecarga que queda enclavado subiendo la presión en la TFA a 5,4 bar para aflojar todos los frenos y a continuación en una segunda fase actuando sobre el pulsador de sobrecarga desenclavándolo se realiza la ecualización de las cámaras de control (presión de referencia de freno) de todos los distribuidores de la composición bajando la presión de nuevo a 5,0 bar a un ritmo por debajo del umbral de sensibilidad o reacción de los distribuidores. Al final de este proceso los frenos están completamente aflojados y la TFA a la presión de 5,0 bar.

A continuación se pasa el conmutador selector a “Modo Test Composición” y desde este instante los procesos de frenado y aflojamiento, pasan a ser controlados desde el nuevo sistema desarrollado para el ensayo del freno. El maquinista puede ya abandonar el puesto de conducción para recorrer la composición verificando el freno de cada uno de los vagones de la composición iniciando el resto de la secuencia de pruebas descrita en el apartado 3 a través del mando por control remoto que además de mostrar la información en tiempo real del proceso permite parar el ensayo cuando se detecta un vagón con anomalías, realizar nuevos procesos para la verificación in situ del vagón afectado así como el inicio del ensayo una vez subsanada la incidencia detectada y este misma operativa puede realizarla en tantos vagones como sea necesario.

5.7. Comunicación remota entre operario y sistema.

El funcionamiento del sistema se controla mediante una unidad de control modular por microprocesador en la que las diferentes funciones se realizan mediante transmisiones de datos por radio entre el operario que realiza la prueba y la unidad de ensayo de freno, o bien en algunas fases del proceso, a través de la propia unidad de ensayo mediante el desarrollo de un programa automático. La unidad de ensayo mandada por radio permite efectuar la comprobación del funcionamiento del freno de la composición en un solo recorrido de ida y vuelta por un solo operario, lo que le confiere una gran flexibilidad y un sustancial ahorro de tiempo. El sistema se compone de:

- Microelectrónica del Sistema (KBGM). Todas las entradas (elementos de servicio, punto de inserción radiofónica, medición de presión) y salidas eléctricas (señales, señalización teledirigida, emisión de presión de régimen, orden de bloqueo) están conectadas con la unidad central modular por microprocesador. El mando de almacenamiento de datos programable consta de módulos individuales, los cuales van montados sobre un rack básico, y pueden ser intercambiados con facilidad y rapidez.
- Modem GSM. Este sistema recibirá las acciones a realizar por el sistema de freno y enviará los resultados al mando.
- Sistema de mando por control remoto. Se encargará de mandar y de mostrar al operario los diferentes estados de la prueba. Desde cualquier lugar de la composición se puede realizar la prueba de freno cuando se esté ante un vagón dudoso.

Todos los procesos estarán registrados en un servidor central. Al final de una prueba de freno, se generará un documento con el resultado de la prueba y los datos recogidos para todo el tren.

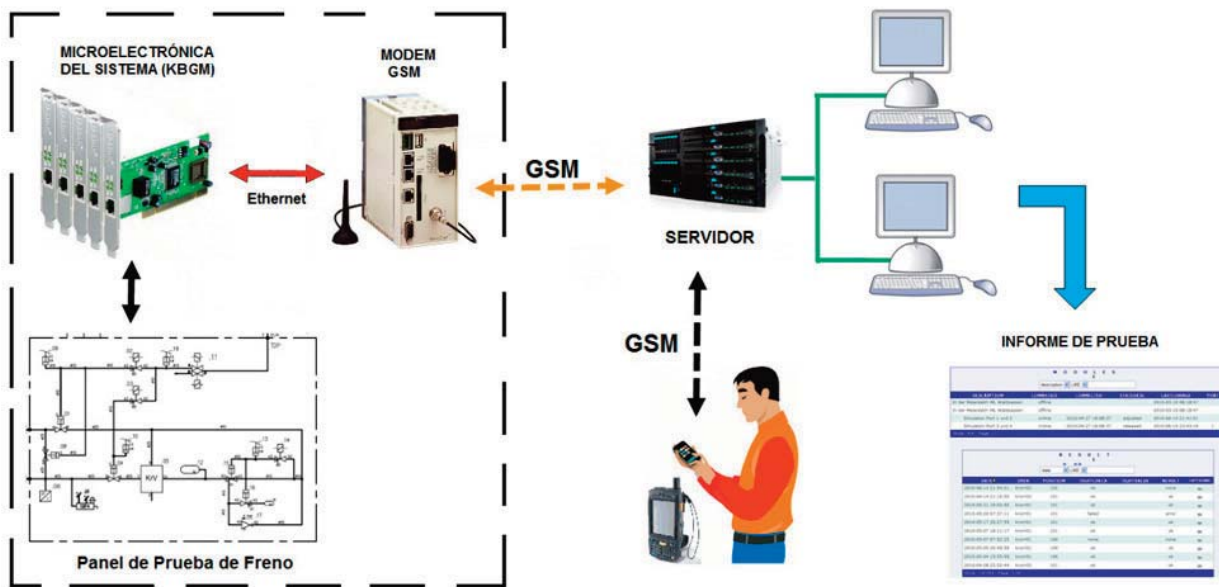


Figura 9. Comunicación Remota entre operario y Sistema de Mando

6. Agradecimientos

Este artículo va dedicado a mi profesor y compañero Rafael A. de Felipe por haberme ayudado y enseñado tanto. A mis padres y mis hermanas por transmitirme su cariño y espíritu trabajador. A todos mis amigos porque son el pilar de mi vida y por último a Gema por hacerme tan feliz.

7. Bibliografía

DE FELIPE CALVO, Rafael. Fundamentos de Freno en Vehículos Ferroviarios. Sociedad Española de Frenos, Calefacción y Señales, S.A. (Grupo Knorr-Bremse) Ed. 04.2012.

RALLO GUINOT, Vicente. La gestión técnica del transporte de mercancías por ferrocarril. Madrid, Febrero de 2012.

UIC 540 Brakes – Air brakes for freight trains and passenger trains. 5th edition, November 2006.

UIC 543 Brake – Regulations governing the equipment of training stock. 13th edition, April 2007.

UIC 541-03 Regulations Concerning Manufacture of the different brake parts. 1st edition. January 1984.

8. Conclusiones

- Se ha desarrollado un sistema de prueba de freno con mando y control automatizado, no realizado hasta la fecha, el cual se puede integrar en locomotoras ya existentes. El cual aprovecha el material de locomotoras de maniobras existente en las estaciones de clasificación (independientemente de su antigüedad) para, con unos costes reducidos de implantación, realizar el test de freno de la composición con un único operario, reduciendo sustancialmente el coste de realización del test del freno.
- La instalación en la locomotora no interfiere en la seguridad del freno de la misma ya que el sistema trabaja en paralelo con el sistema de mando de freno de la locomotora inhibiendo el aflojamiento del freno. Además en caso de fallo se han previsto sistemas manuales de aislamiento del sistema de ensayo para habilitar el aflojamiento del freno de la locomotora y poder realizar un servicio normal.
- El desarrollo se ha abordado desde el sistema de mando puramente neumático y lógica cableada al sistema de mando más sofisticado con convertidor electroneumático compuesto por electroválvulas de llenado y vaciado y transductor de presión para cerrar el bucle de control y por supuesto lógica programada.
- En ambos desarrollos se ha dotado a nivel de control de un sistema de diagnosis compuesto por diferentes presostatos para la vigilancia de los distintos circuitos involucrados en los diferentes estados de las válvulas de control.

Estudio del Desgaste Ondulatorio de una vía con mantas resilientes bajo placa de hormigón mediante el análisis de su comportamiento vibratorio

Study of the Rail Corrugation in a track with elastic material under concrete plate through the analysis of its vibratory behavior

Carla García Román

Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes , Universidad Politécnica de Valencia

Resumen

El desgaste ondulatorio es una patología que aparece en casi todas las vías férreas, provocando un progresivo desgaste en la cabeza del carril que conlleva un incremento de los costes de mantenimiento de la vía. La forma más común de enfrentarse a dicho desgaste es el uso de medidas correctivas (amolado). Sin embargo, en el presente estudio se pretende estudiar la aplicación de una medida preventiva que impida su aparición. Para ello, se ha analizado la influencia de mantas resilientes colocadas bajo placa de hormigón en el comportamiento vibratorio de una vía mediante modelización matemática. Los resultados muestran una reducción de la amplitud de las vibraciones y una modificación de sus frecuencias.

Palabras clave: Desgaste ondulatorio; Mantas resilientes; Simulink; Espectro de frecuencia.

Abstract

Rail corrugation is a pathology that appears in almost all railroads, causing a progressive corrugation at the head of the rail that leads to an increase of costs for track maintenance. The most common way to deal it is the use of corrective measures (grinding). However, in the present study aims to investigate the implementation of a preventive measure to prevent its appearance. To do this, it has analyzed the influence of elastic material placed under concrete plate in the vibratory behavior of a track through mathematical modeling. The results show a reduction in the amplitude of the vibration and a modification of their frequencies.

keywords: Rail corrugation; Elastic material; Simulink; Frequency spectrum.

1. Introducción

El estudio de las vibraciones producidas por la explotación ferroviaria es un tema de continuo análisis, pues no sólo suponen un impacto negativo frente al confort vibratorio del viajero, sino también un impacto estructural que provoca un progresivo desgaste en la cabeza del carril dando lugar al fenómeno conocido como desgaste ondulatorio.

El desgaste ondulatorio de las vías es una patología que aparece de un modo u otro (incluso diversas manifestaciones a la vez) en casi todas las vías férreas existentes. Este motivo ha llevado a que sea uno de los fenómenos de desgaste más estudiados desde hace más de cien años, aunque todavía actualmente, parezca no tener solución.

Hasta el momento, la forma más común de enfrentarse al desgaste ondulatorio era el uso de medidas correctivas, entre las que destaca el amolado de la cabeza del carril una vez ha experimentado el desgaste. Sin embargo, frente a estas medidas correctivas cabe la posibilidad de aplicar ciertas medidas preventivas que impidan la aparición de dicho desgaste en el carril.

Esta alternativa no convencional de tratamiento del desgaste ondulatorio pretende no sólo suponer una solución al desgaste estructural propiamente producido, sino también, incidir en la parte económica de la explotación ferroviaria suponiendo una reducción de los costes de mantenimiento.

La motivación de encontrar una medida preventiva supone una profunda y extensa investigación de lo que ha sido a lo largo de los años el desarrollo de este fenómeno. De forma generalizada, se acepta que el desgaste ondulatorio sea identificable visualmente y tenga unas características ondulatorias relativamente constantes (López Pita, 2006), por lo que es habitual clasificar el fenómeno basándose en el concepto de longitud de onda. Al respecto, la Dirección Técnica de Renfe (N. R. V. 7-5-2.1, 1993) distingue entre un desgaste de onda muy corta (3-6 cm), onda corta (6-25 cm), onda media (30-60 cm) y onda larga (>60 cm), tratando de analizar las consecuencias que la aparición de un tipo u otro de desgaste suponen sobre el deterioro estructural de la vía.

De este modo, se ha establecido que el desgaste ondulatorio supone la aparición de una serie de defectos en el carril que limitan su vida útil, poniendo en riesgo la salud humana a largo plazo, lo cual implica un fuerte impacto desde el punto de vista económico, pues por una parte incrementa los costes de mantenimiento hasta en un 30% y por otra parte, supone una importante pérdida en la explotación ferroviaria debido a la necesidad de reemplazar de forma prematura aquellos elementos de la vía con un elevado coste. Un estudio reciente declara que en Europa se gastan unos 60 millones de euros al año en tratamientos paliativos contra dicho desgaste y que, de forma orientativa, el coste porcentual sobre el total de los costes de conservación de la vía del reemplazo de carriles puede suponer del orden del 25%; y de las traviesas, sujeciones y balasto, el 30% aproximadamente (Informe Comisión Europea de Ferrocarriles, 2010).

De esta necesidad de enfrentarse al desgaste ondulatorio sin que ello implique costosas técnicas que no lo desvanecen, sino que lo camuflan por un periodo de tiempo determinado, surgen numerosas líneas de investigación en busca de tratamientos preventivos que se centran en eliminar o cambiar las frecuencias dinámicas naturales de la vía o el vehículo para evitar el mecanismo de fijación de la

longitud de onda (S. Grassie, 1993), modificar las condiciones geométricas de la rodadura (J. Sadeghi, B. Akbari, 2006), mejorar la resistencia de los elementos afectados por el desgaste ondulatorio centrándose principalmente en tratamientos térmicos del acero por ser el material de contacto (J. Cardona et al., 2008) u optimizar la fricción de contacto entre rueda-carril para disminuir las fuerzas de contacto (R. Clark et al., 1982).

De todas estas líneas de investigación, este artículo se centra en analizar el comportamiento del carril frente al desgaste ondulatorio que experimenta al cambiar las frecuencias dinámicas naturales de la vía, mediante la colocación de mantas resilientes bajo placa de hormigón. Para ello, en primera instancia se detallará el modelo matemático que define el fenómeno vibratorio debido al paso de un tranvía sobre el conjunto de una vía en placa. A continuación, se calibra y valida el modelo por comparación de resultados con los datos experimentales obtenidos a partir de un muestreo de aceleraciones en diversos puntos del tramo de vía objeto de estudio. Posteriormente, se estudia el comportamiento del modelo frente a excitaciones senoidales que simulen las frecuencias de vibración propias de un tranvía para analizar la influencia de las mantas resilientes según sus características elásticas. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos para exponer las conclusiones derivadas del presente estudio.

2. Estudio del desgaste ondulatorio mediante modelado matemático

El estudio se enmarca dentro de una explotación ferroviaria de ámbito urbano, en un tramo en el que hay colocadas, bajo la placa de hormigón, mantas resilientes con distintas propiedades elásticas.

Las mantas resilientes son compuestos de fibras minerales y productos bituminosos, con ciertas propiedades elásticas que permiten el aislamiento de la vibración.

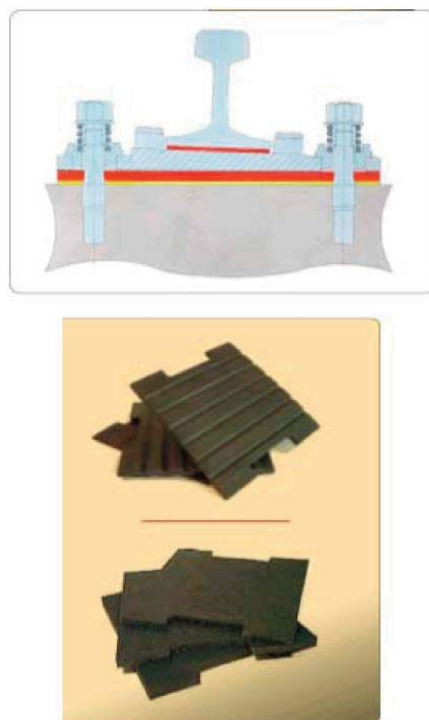


Fig. 1. Mantas resilientes en el ámbito ferroviario.

2.1. Descripción de los datos sobre los que se trabaja

El tramo evaluado pertenece a la línea 4 del tranvía de Valencia, la cual cuenta con una longitud de 15,921 km y 33 estaciones a lo largo de su recorrido. Presta servicio a más de 6 millones de pasajeros anualmente y pretende ampliar su accesibilidad en un futuro. Concretamente, el tramo de estudio se encuentra ubicado entre las paradas de Vicent Andrés Estellés y TVV, con una longitud inferior a 1 km.

Este tramo cuenta con un ancho de vía de 1000 mm (el unificado de FGV) y se encuentra localizado entre el PK 0+220 y 0+320, donde las estaciones consideradas son tramos de vía en placa.

El carril sobre el que se trabaja es de tipo garganta (Phoenix) Ri60, soldado en Barra Larga Soldada, con una anchura de cabeza igual a 113 mm, una anchura de patín igual a 180 mm y una altura de 180 mm. Sus principales características mecánicas y geométricas son:

Tabla 1. Principales características mecánicas y geométricas del carril de garganta Ri60

	Phoenix Ri60
Masa	60,59 kg/m
Área	77,19 cm ²
Momento de inercia	3352,9 cm ⁴

La placa de hormigón existente en el tramo, con dimensiones de 1,25x0,2 m, posee una resistencia característica de proyecto de 20 MPa y una densidad de 25 KN/m³.

En cuanto a los materiales elásticos intervinientes, destacar la placa de asiento, cuyas características elásticas dependen del tipo de fabricante, siendo su rigidez de $15 \cdot 10^7$ N/m y su amortiguamiento viscoso de $19 \cdot 10^3$ Ns/m; y las mantas resilientes existentes bajo placa de hormigón, que son de dos tipos: de espuma de poliuretano (cuyo fabricante es CDM) y de resina de caucho (fabricadas por SYLOMER). Estas mantas poseen unas dimensiones medias de 2x2,5 m y unas características elásticas confidenciales a petición de los fabricantes.

Por la línea 4 del tranvía de Valencia circulan dos tipos de tranvías diferentes: el modelo Siemens-Düwag UT-3800 y el Bombardier Flexity Outlook; cuyas características principales quedan recogidas en la siguiente tabla:

Tabla 2. Principales características de los tranvías que circulan por la línea 4 del tranvía de Valencia

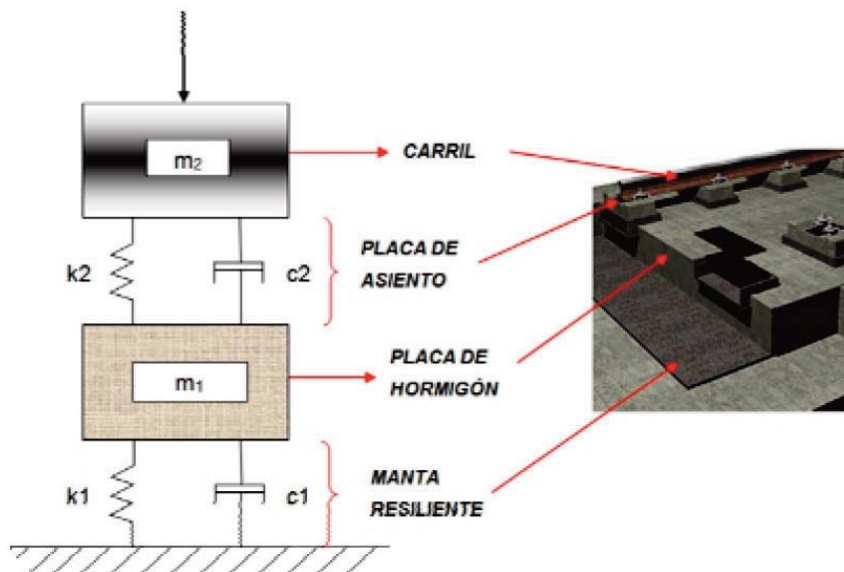
Características	Siemens Düwag UT-3800	Bombardier Flexity Outlook
Velocidad comercial	18 km/h	18 km/h
Velocidad máxima	50-30-10 km/h	50-30-10 km/h
Longitud	23,78 m	23,78 m
Puertas	4 dobles lateral derecho	4 dobles y 2 sencillas
Capacidad	153 viajeros	200 viajeros

Finalmente, para la toma de datos la instrumentación utilizada ha sido un martillo instrumentado PCB (modelo 086D50), encargado de transmitir una excitación inicial a la vía; una serie de acelerómetros PCB (modelo 393B05) colocados en distintos puntos con un rango de frecuencia entre 0,7-450 Hz, una resolución de $4e-5$ m/s² y masa de 50 g; y un analizador dinámico portátil Photon de Dactron Inc., cuya frecuencia de muestreo ha sido de 375 Hz.

2.2 Descripción del modelo que representa el paquete de vía

Para el análisis dinámico de la interacción vía-vehículo, se ha optado por modelizar el paquete de vía como un sistema oscilante formado por un conjunto de masas rígidas (m_i), unidas entre sí por un conjunto de muelles y amortiguadores caracterizados, respectivamente, por sus constantes elásticas (k_j) y sus coeficientes de amortiguamiento (c_k). En particular, se ha optado por un modelo dinámico de dos masas en el que la masa superior representa el carril apoyado sobre una placa de asiento modelizada mediante un muelle vertical acoplado a un amortiguador viscoso; y la masa inferior, la placa de hormigón apoyada sobre una manta resiliente modelizada mediante un muelle vertical acoplada a un amortiguador viscoso.

Fig. 2. Esquematación del modelo de 2 GDL utilizado.



Además, se ha tenido en cuenta una serie de hipótesis iniciales que permiten realizar simplificaciones en cuanto al cálculo se refiere y que han consistido en considerar el carril y la placa de hormigón como sólidos rígidos, ya que la existencia de los elementos elásticos considerados lleva a que su contribución elástica en el modelo sea irrelevante; y el terreno de apoyo infinitamente rígido y con desplazamiento despreciable frente a las vibraciones que experimenta el paquete de vía.

Tras las hipótesis planteadas y aplicando el segundo principio de la dinámica, se obtienen las ecuaciones que rigen el comportamiento vibratorio de la superestructura ferroviaria planteada:

- Comportamiento del carril (m_2):

$$F(t) = m_2 * \ddot{x}_2 + c_2 * (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 * (x_2 - x_1) \quad (1)$$

- Comportamiento de la placa de hormigón (m_1):

$$0 = m_1 * \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_0) + c_1 * (\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k_2 * (x_1 - x_2) + c_2 * (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (2)$$

La interacción vía-vehículo no es sino un modelo de interacción entre una carga y una estructura mecánica, estando representada la primera por el paso del tranvía sobre la vía; y siendo la estructura el propio paquete de vía.

Para la evaluación de la respuesta dinámica de un vehículo frente a irregularidades en la interfaz rueda-carril, se utilizan modelos de Función de Transferencia, que permiten predecir la respuesta de un sistema conocidas las excitaciones a las que éste se ve sometido. Así, variables como las aceleraciones (variables respuesta del sistema o “outputs” del modelo) están relacionadas con fuerzas ejercidas sobre la vía al paso del vehículo ferroviario (excitaciones del sistema o “inputs” del modelo) a través de cierta Función de Transferencia, $H(s)$, expresada en función de la frecuencia.

Como en ocasiones, la Función de Transferencia puede resultar compleja de calcular, por la cantidad de parámetros intervinientes, otra manera de obtener las mismas conclusiones es mediante la representación Estado-Espacio, que se define como el espacio donde los sucesivos vectores de estado describen la evolución del sistema como función del tiempo.

De manera que, operando las ecuaciones que rigen el comportamiento del paquete de vía y considerando las hipótesis planteadas, se obtienen las ecuaciones de Estado-Espacio:

$$\ddot{x}_2 = \frac{k_2}{m_2} * x_1 - \frac{k_2}{m_2} * x_2 + \frac{c_2}{m_2} * \dot{x}_1 - \frac{c_2}{m_2} * \dot{x}_2 + \frac{F(t)}{m_2} \quad (3)$$

$$\ddot{x}_1 = -\frac{k_1}{m_1} * x_1 - \frac{k_2}{m_1} * x_1 + \frac{k_2}{m_1} * x_2 - \frac{c_2}{m_1} * \dot{x}_1 - \frac{c_1}{m_1} * \dot{x}_1 + \frac{c_2}{m_1} * \dot{x}_2 \quad (4)$$

Así, con la modelización planteada, se podrá calcular el desplazamiento de cada uno de los componentes de la vía que intervienen en el modelo planteado y su velocidad. No obstante, en el análisis objeto de estudio, lo realmente interesante es la amplitud de la aceleración y la frecuencia de vibración.

Para el cálculo de la amplitud la herramienta empleada es Simulink, una aplicación de Matlab que permite desarrollar un modelo a partir de las ecuaciones que rigen su comportamiento. Para ello,

requiere unos parámetros de entrada ($F(t)$ que es la excitación de la vía; y los valores característicos de los parámetros que intervienen en las ecuaciones) y devuelve información de salida, que en este caso se ha programado para que sean las aceleraciones de las masas del modelo (carril y placa de hormigón).

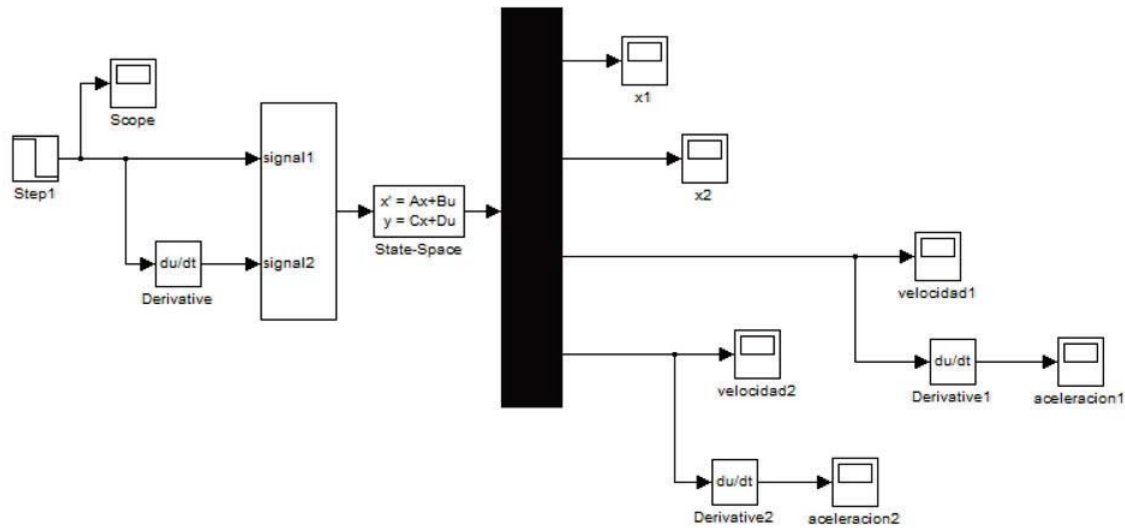


Fig. 3. Esquema del modelo de 2 GDL mediante un diagrama de bloques implementado en Simulink.

En cuanto a la frecuencia, se puede determinar mediante el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform). Esta herramienta permite determinar la señal vibratoria en frecuencia (espectro de frecuencias) a partir de los valores de la señal en tiempo. Para ello, se implementó un algoritmo en Matlab a partir del comando “fft”, que permite obtener gráficos amplitud de aceleración-frecuencia.

La función $X = \text{fft}(x)$ implementada en Matlab se calcular a partir de las siguientes ecuaciones:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N \left(x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \right) \quad (5)$$

$$x(j) = (1/N) \sum_{k=1}^N \left(X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \right) \quad (6)$$

$$\omega_N = e^{(-2\pi i)/N} \quad (7)$$

donde N es la longitud del vector x .

2.3. Calibración y validación del modelo

Representado el modelo en Simulink, se introduce el valor de los parámetros que intervienen. En primer lugar, se da valor a las masas que son información conocida. Por una parte, de la ficha técnica del carril se sabe que $m_2=60,59$ Kg/m; y por otra parte, siendo conocida la densidad del hormigón (2500 kg/m³) y las dimensiones de la placa de hormigón ($1,25 \times 0,2$ m), se conoce que $m_1=625$ kg/m.

En cuanto a los valores utilizados para la rigidez de los materiales elásticos, ha sido necesaria una calibración dentro de un rango válido existente proporcionado por los fabricantes y una posterior validación del error cometido a partir de los datos experimentales de los que se disponía.

Para el cálculo del amortiguamiento, se ha utilizado el coeficiente de amortiguamiento relativo calculado como el 10% del valor del amortiguamiento crítico que, a su vez, es función de la rigidez y la masa del elemento considerado.

Tabla 3. Valores de las masas, rigidez y amortiguamiento del modelo implementado

Rigidez y amortiguamiento	k_i	c_i
Placa de asiento	$k_2=15e7$ N/m	$c_2=19049,41$ N*s/m
Velocidad máxima	$k_1=9e6$ N/m	$c_1=15000$ N*s/m

Así, introducidos en el modelo estos valores, se obtuvo como resultado un vector de aceleraciones en la placa de hormigón (lugar donde se encontraban colocados los acelerómetros durante el muestreo in situ) al que le fue aplicado el algoritmo de la FFT para obtener el espectro de frecuencias y poder analizar la respuesta del modelo a través de un gráfico amplitud aceleración-frecuencia y compararlo con los datos experimentales de partida para comprobar la validez del modelo.

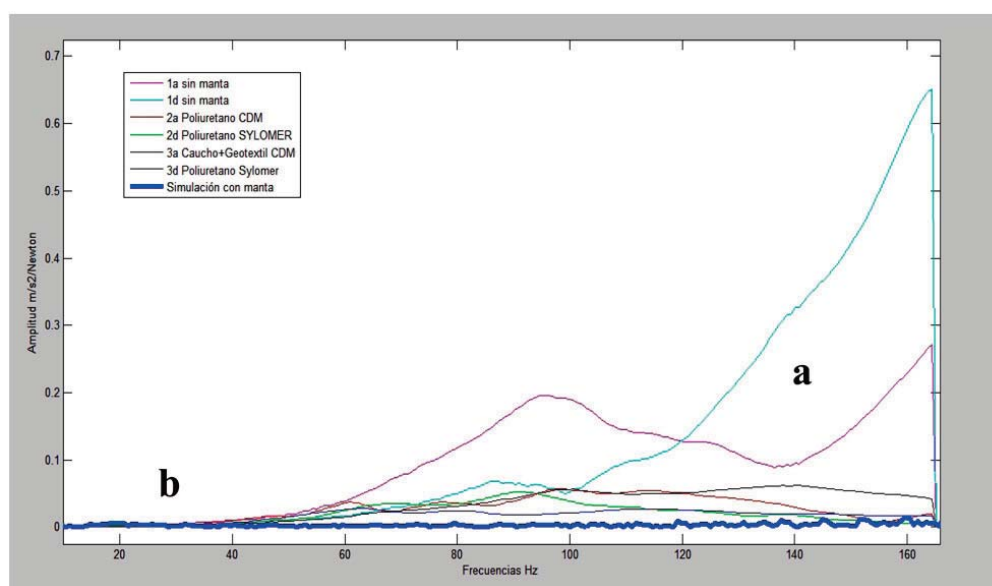


Fig. 4. Representación en frecuencia de la amplitud de vibración de una excitación sobre la vía provocada por un martillo (datos experimentales, "a") y una excitación unitaria (simulación, "b").

A la vista de las gráficas se concluye que el comportamiento del modelo se parece al correspondiente al tramo de vía en el que se encuentra una manta mezcla de caucho y geotextil, del fabricante CDM, con un error asumible. Por tanto, se da el modelo por validado y se considera aceptable para realizar el análisis al respecto del desgaste ondulatorio.

3. Análisis de resultados

Con el modelo apto para reproducir de una manera aceptable el comportamiento de la vía al contacto rueda-carril, se realiza un análisis de los modos de vibración del paquete de vía una vez excitada por una señal que refleje las frecuencias propias de paso de un tranvía. Para ello, el cambio realizado en el modelo es la sustitución de la fuente excitadora por un sumatorio de senoides que representen las frecuencias propias de paso de un tranvía, obtenidas aplicando la FFT a los datos de tiempo-aceleración correspondientes a un día de medición sobre los tranvías que circularon por el tramo de vía. Reuniendo el valor de los picos de amplitud y sus correspondientes frecuencias, se ordenan en una tabla y se introducen en la fuente excitadora del modelo:

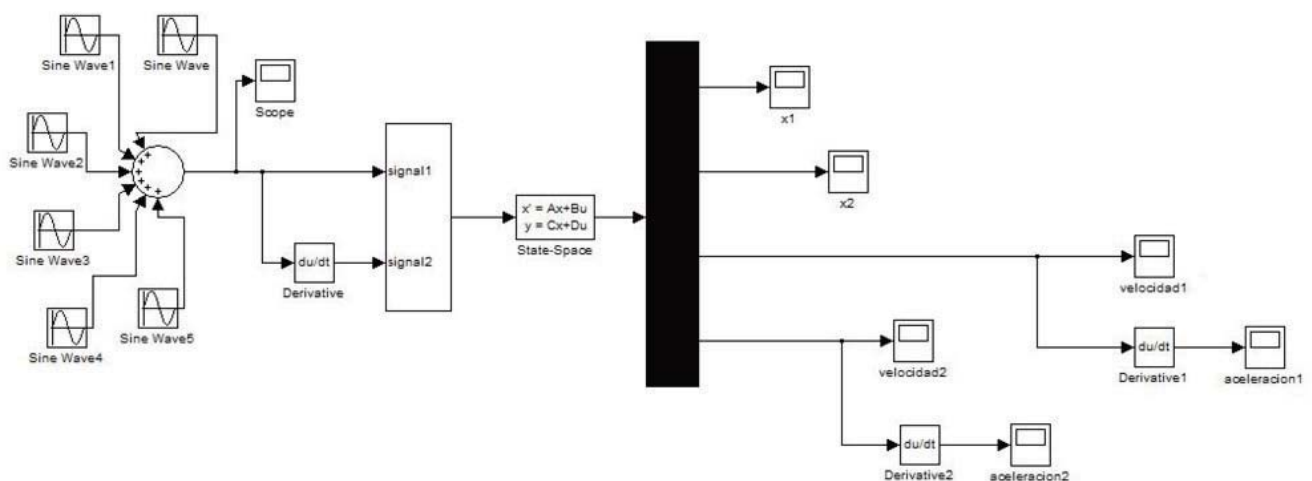


Fig. 5. Esquema del modelo de 2 GDL mediante un diagrama de bloques implementado en Simulink con suma de senoides como fuente excitadora.

3.1. Análisis de una vía sin manta

Si se analiza el espectro de frecuencias de una vía que no dispone de manta resiliente bajo la placa de hormigón al paso de un tranvía cuya velocidad de circulación sea de 15km/h el resultado es:

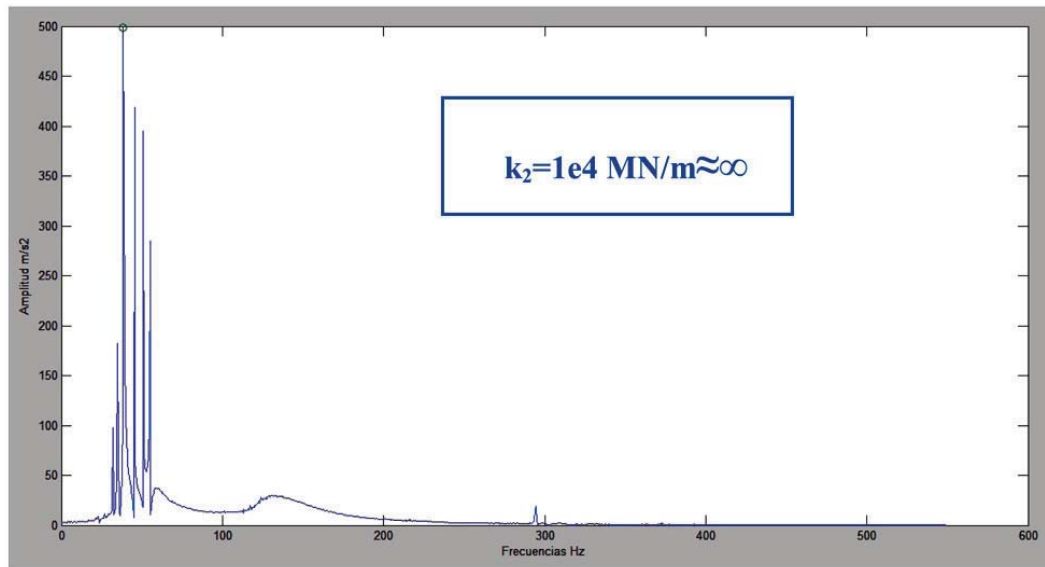


Fig. 6. Representación en frecuencia de la amplitud de vibración del modelo sin manta resiliente en la cabeza del carril.

Para el análisis del Desgaste Ondulatorio, se recurre al concepto de longitud de onda característica calculada en función de la velocidad de circulación del tranvía v y la frecuencia f detectada:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (8)$$

Resumiendo el gráfico anterior y calculando la longitud de onda correspondiente a cada frecuencia característica, se concluye que el rango de frecuencias en el que se detecta una mayor amplitud de vibración es 3,48-6,42 cm, lo cual, según la clasificación del Desgaste Ondulatorio realizada por la Dirección Técnica de Renfe, se corresponde con un desgaste de onda corta y muy corta.

3.2. Análisis de una vía con manta

Si se analiza una vía con características análogas pero en la que se ha colocado un determinado tipo de manta resiliente bajo la placa de hormigón, frente al paso del mismo tranvía circulando a 15 km/h, se obtiene la siguiente gráfica:

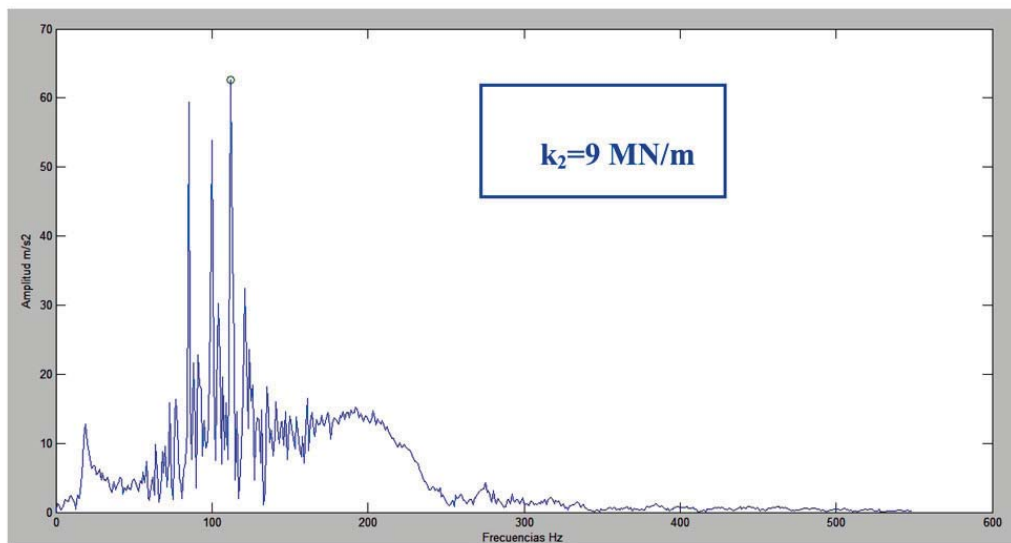


Fig. 7. Representación en frecuencia de la amplitud de vibración del modelo con manta resiliente de rigidez 9 MN/m en la cabeza del carril.

En este caso, el rango de frecuencias en el que se producen los picos de amplitud de las vibraciones es más amplio, dando lugar a un intervalo de longitud de onda comprendido entre 3,21-20,85 cm, lo cual implica, nuevamente, un desgaste ondulatorio de onda corta y muy corta.

Para tener en cuenta el efecto de las características elásticas de la manta, se disminuye la rigidez de la misma de 9 MN/m a 5 MN/m, obteniendo un resultado en frecuencia de la amplitud de vibración del modelo en la cabeza del carril resumido por el siguiente gráfico:

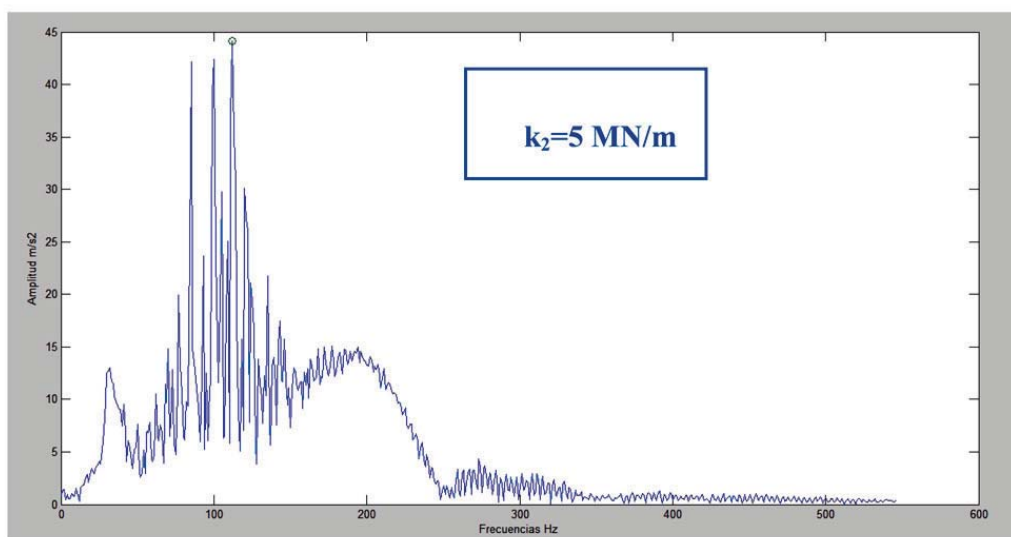


Fig. 8. Representación en frecuencia de la amplitud de vibración del modelo con manta resiliente de rigidez 5 MN/m en la cabeza del carril.

En este caso, las amplitudes máximas se corresponden con un rango de frecuencia entre 90 y 130 Hz lo cual equivale a una longitud de onda entre 4,6-3,2 cm, que representa un desgaste ondulatorio de onda muy corta.

Por otra parte, si se aumenta la rigidez de la manta de 9 MN/m a 25 MN/m, que todavía se considera un valor de rigidez aceptable para el fabricante considerado, la respuesta del modelo es:

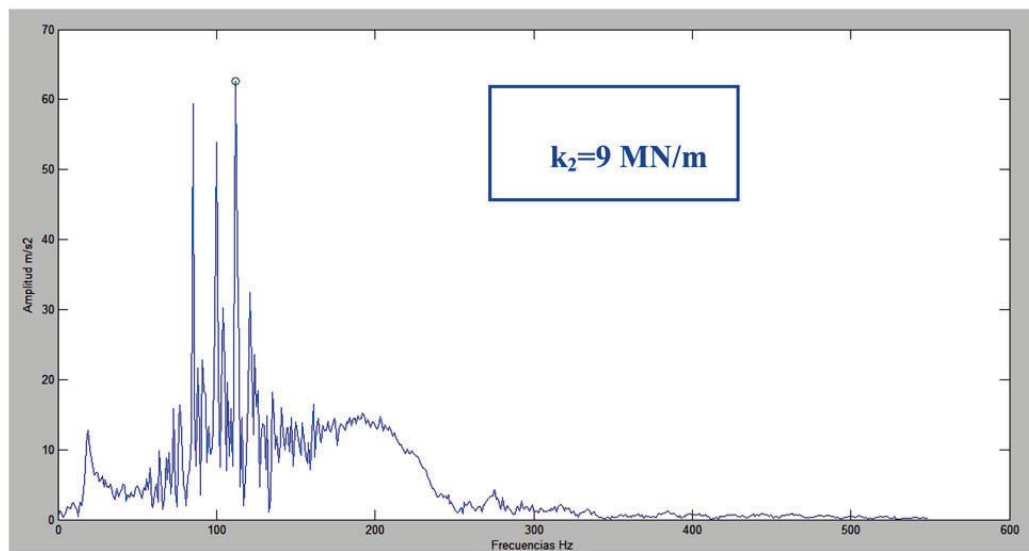


Fig. 9. Representación en frecuencia de la amplitud de vibración del modelo con manta resiliente de rigidez 25 MN/m en la cabeza del carril.

Se obtienen unos resultados que no difieren mucho de los anteriores desde el punto de vista del desgaste ondulatorio, pues el rango de frecuencias en el que se alcanzan las mayores amplitudes coincide con el anterior, 90-130 Hz, y por tanto, el desgaste ondulatorio producido es nuevamente de onda muy corta.

De esta manera, y a la vista de los resultados, la única diferencia que se observa tras la variación de las características elásticas de la manta es que cuanto mayor es su rigidez, mayores son las amplitudes de vibración alcanzadas.

3.3. Comparación de resultados

Tras la comparación de las gráficas en frecuencia pertenecientes al comportamiento de modelo con y sin manta resiliente bajo placa de hormigón, se puede destacar que la presencia de la manta disminuye o amortigua las vibraciones que se producen con el paso del tranvía, pues consigue disminuir la amplitud de vibración máxima de la vía sin manta hasta un 87%.

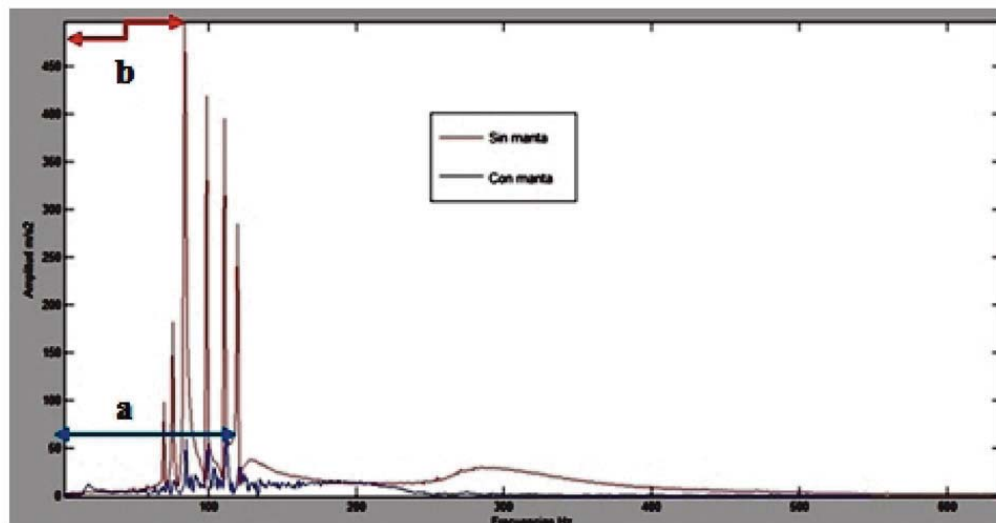


Fig. 10. Representación comparativa en frecuencia de la amplitud de vibración del modelo con manta (a) y sin ella (b) en la cabeza del carril.

Sin embargo, en referencia al desgaste ondulatorio, la presencia de la manta no consigue evitarlo sino sólo modificar las características del mismo en función de la rigidez de la manta existente.

4. Conclusiones

En este artículo se ha mostrado el comportamiento vibratorio de una vía en placa como consecuencia de la interacción rueda-carril, a través de un modelo que permite evaluar, de un modo satisfactorio, la señal vibratoria en función del tiempo mediante la FFT, obteniendo una respuesta en frecuencia (espectro de frecuencias) que permite estudiar el desgaste ondulatorio producido.

Se ha demostrado que la colocación de mantas resilientes bajo placa de hormigón reduce, de forma significativa, la amplitud de las vibraciones experimentadas por la misma vía sin mantas y además, que desde el punto de vista del desgaste ondulatorio experimentado por la cabeza del carril, la existencia de mantas no consigue eliminar el fenómeno, sino modificarlo en función de las características elásticas de la manta resiliente.

A fin de continuar con una línea de investigación que permita encontrar una medida preventiva contra el desgaste ondulatorio e implique una reducción de los costes de mantenimiento de la vía, conviene realizar un estudio de las partes del vehículo ferroviario que tienen una mayor incidencia en la aparición del desgaste y analizar la forma de intervenirlas con la finalidad de paliar las consecuencias de deterioro estructural de dicho desgaste.

Referencias

- [1] López Pita, A. (2006). Infraestructuras Ferroviarias. *Universidad Politécnica de Catalunya*.
- [2] Sadeghi, J.; Akbari, B. (2006). Field investigation on effects of railway track geometric parameters on rail wear. *Jzus*.
- [3] Cardona, J.; Orta, J.; Romeu, J. (2008). Influencia de la rugosidad del carril en la generación de vibraciones en infraestructuras ferroviarias. *Acústica*.
- [4] Grassie, S.; Kalousek, J. (1993). Rail corrugation: Characteristics, causes and treatments. *Instn. Mechanical Engineering*.
- [5] Grassie, S.; Kalousek, J. (2004). Rail corrugation: Advances in measurement, understanding and treatment. *Wear*.
- [6] Clark, R. A.; Dean, P. A.; Elkins, J.; Newton, S. G. (1982). An investigation into de dynamic effects of railway vehicles running on corrugated rails. *Journal Mechanical Engineering Science*.
- [7] Mantenimiento de Infraestructuras Renfe N.R.V. 7-5-2.1 (1993). Conservación de la vía. Amolado de las superficies activas del carril en vía. *Dirección Técnica/Jefatura de vía*.
- [8] Comisión Europea de Ferrocarriles (2011). Informe económico y de actividad 2010. *Madrid*.
- [9] García, C. (2012). Estudio del Desgaste Ondulatorio mediante la modelización analítica de las vibraciones experimentadas por el paquete de vía y aplicación de mantas resilientes bajo placa de hormigón como elemento de prevención. Aplicación a la línea 4 del tranvía de Valencia. *Proyecto Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Valencia*.

Evaluación de la repercusión económica ligada al coste energético de las limitaciones de velocidad por precauciones en las líneas férreas

Energetic and economic evaluation temporary of speed limitations in railways

Rafael Navarro López

Departamento de Ingeniería e infraestructura de los transportes
Universidad Politécnica de Valencia

Resumen

En la operación de sistemas ferroviarios, el gasto energético es una de las principales partidas económicas. Con el fin de optimizar tanto el sistema como los recursos disponibles, se pretende evaluar la influencia de las precauciones temporales de velocidad en el consumo energético. Para ello, se ha modelizado el consumo energético del material móvil que opera en un servicio ferroviario y se ha generado hipótesis de consumo suprimiendo las precauciones, constatando su influencia. Por otro lado, se ha estimado el coste que supondría la corrección de los defectos presentes en la infraestructura estableciendo una comparación con el sobre coste energético obtenido. Por último, se evalúa la conveniencia de la ejecución de las actuaciones propuestas.

Palabras clave: Consumo energético, optimización, precaución temporal de velocidad, sistema ferroviario.

Abstract

In railway operation, one of the most important parts of the investment is the energy consumption. With the objective of optimizing the railway system and energy resources, the intention is to evaluate the temporary speed restrictions, which influence the energy consumption. For this reason, by modelling the energy consumption in a train, which runs the railway service and creating a hypothesis of consumption without the speed's limitation, one will evaluate its influence. On the other hand, one will have to estimate the cost of the correction of the defects, which are the cause of the speed restrictions. By comparing this cost with the extra energy cost the economic profitability of track repairing is evaluated.

keywords: Energy Consumption, optimize, temporary restrictions, railway system.

Abreviaturas

E	Energía consumida/disipada	G	Gravedad
R_a	Resistencia al avance	I	Pendiente
l_T	Longitud total del tramo	R_{ac}	Resistencia de avance en curva
M	Masa del material móvil	a, β	Semiejes del elipsoide WGS-84
a	Aceleración	Ψ	Vector posición
C_{mg}	Centro de masas giratorias	E	Excentricidad del elipsoide WGS-84
A, B y C	Factores característicos del material rodante	Φ	Longitud en radianes
V	Velocidad		

1. Introducción

La evolución social y económica desarrollada en los últimos 20 años, sumado con la coyuntura económica actual, es la base donde se sustenta el cambio de modelo ingenieril. Por un lado surge la necesidad de crear modelos de desarrollo integrados en el medio ambiente con el objetivo que su impacto ambiental sea el menor posible. La creación de normativas que obligan al cumplimiento de requerimientos ambientales genera el interés de las empresas y administraciones de desarrollar sistemas más respetuosos con el medio ambiente y evitar penalizaciones por emisiones contaminantes que gravan sus balances económicos. Por otro lado, la coyuntura económica actual, está provocando un cambio estructural en la ingeniería civil. Hoy en día la disminución de los recursos económicos de los estados y la subida de precios de los combustibles, ha generado en el sector la necesidad de aportar un servicio a la sociedad pero mediante un sistema económicamente viable.

El sector del transporte, tras el de la industria, es uno de los sectores de actividad de mayor consumo de energía en los países desarrollados. En el caso concreto de España es el principal sector de consumo de energía, representando el 33% de del consumo energético, además de ser el que tiene más altos ritmos de crecimiento y mayor dependencia de los combustibles fósiles, implicando la necesidad de las importaciones del exterior. Por todo ello, se debe insistir en la importancia de la reducción de del consumo de energía y de las emisiones de contaminantes. En el sector ferroviario español, la partida de gasto dedicado a la energía de tracción en la principal empresa operadora del país, Renfe-operadora, supone un 10.1% del total de su reparto anual de gastos. (Renfe, 2009).

Con lo cual se puede concluir que la motivación inicial del estudio ha sido la obtención de la optimización del sistema ferroviario tanto en términos energéticos como en términos económicos.

La estimación de los costes totales asociados al consumo de energía se realiza, en muchas ocasiones, para el sistema integrado, que una vez estandarizados otorgan el consumo energético del sistema. Esto presenta la desventaja de no poder discretizar dichos datos para los distintos subsistemas y su consiguiente estudio y optimización. Esta necesidad de optimización es capital en las líneas férreas de baja densidad, donde los márgenes de explotación son reducidos o incluso deficitarios.

El desarrollo de modelos de cálculo representa el comportamiento real de un sistema mediante variables cuantificables. El objetivo es realizar una representación lo más real posible para evaluar su comportamiento de una forma aproximada. Por tanto, se debe definir los parámetros del modelo que resulten de relevancia para la mejor aproximación a la situación real. El sistema ferroviario es un complejo sistema de múltiples variables que interactúan entre sí, aun así estas formulaciones consideran tres factores principales:

- Trazado, característica principal del sistema de consumo, representado por el perfil de velocidades. Dicho perfil de velocidades es función de la pendiente, la geometría del trazado en planta y las características técnicas de los componentes de la vía.
- Geometría del tren: donde es de relevancia la masa, número de ejes, superficie transversal y “perímetro mojado”.
- Conducción, debido a la existencia de un rango de velocidades característico en los que el rendimiento energético del sistema de tracción es mayor. Al divergir de esta velocidad de “equilibrio” o “basal” el consumo energético aumenta tanto para velocidades superiores como inferiores.

Existen diversas formulaciones, basadas en estos parámetros, para obtener el consumo energético del material móvil: los modelos empíricos y el modelo basado en las ecuaciones de la dinámica. Las formulaciones empíricas, fundamentadas en experiencias y características locales, son difícilmente extrapolables a otros servicios distintos y por tanto coartan la posibilidad de aplicación en un ámbito general.

Con el objetivo de regenerar y reactivar líneas férreas ya construidas y con unos condicionantes ya determinados, se ha pretendido evaluar la afección en el consumo de los condicionantes operacionales. A igualdad de condicionantes de trazado y material móvil, el factor más determinante es la variación de velocidad. A mayor variabilidad de ésta, mayor consumo energético. Para focalizar el estudio, se ha particularizado el análisis estimando el sobreconsumo generado por las restricciones temporales de velocidad debidas a un deterioro de las condiciones originales de la infraestructura, mediante el cálculo del consumo energético en diferentes escenarios que permiten evaluar el grado de afección en el consumo de los distintos defectos. Una vez obtenido el sobre coste energético y con la finalidad de optimizar, tanto energética como económicamente, la línea férrea, se realiza una estimación económica de las correcciones a desarrollar para suprimir las precauciones temporales y se establece una comparativa de idoneidad de las actuaciones o cuales de estas son potencialmente rentables.

2. Desarrollo teórico y experimental

En el sector ferroviario se denomina precaución a la limitación de velocidad impuesta por dos posibles factores, el trazado, lo que genera precauciones fijas, es decir las velocidades máximas permitidas de circulación; y el segundo factor el estado de la infraestructura que reduce la velocidad de manera temporal hasta la corrección del defecto. Estas limitaciones, además de variar el perfil de velocidades, provocan un aumento en el consumo energético para mantener el mismo tiempo de viaje, debido a la reducción de los tramos en los que el tren circula en deriva o bien aumentando la velocidad máxima en otros puntos del trazado. Si como consecuencia de una limitación puntual de velocidades

se aumenta el tiempo de viaje, el tren puede perder atractivo frente a otros medios. El origen de estas limitaciones puede ser por defectos en el propio trazado o por cambios en la operatividad del servicio ferroviario.

2.1. Descripción del modelo

El modelo empleado en este estudio ha sido el modelo basado en las ecuaciones de la dinámica debido a su formulación, aplicable en todos los casos. Se basa en la resultante de fuerzas actuantes sobre el material móvil en cada instante de tiempo. Esta formulación se ha extraído de tratados de ferrocarriles consultados como material bibliográfico para el estudio (García, 2007)

$$E = R_a \cdot l_T = (M \cdot a \cdot cmg + M \cdot g \cdot i + A + B \cdot V + C_T \cdot C \cdot V^2 + R_{ac}) \cdot l_T \quad (I)$$

Dicha resultante es función de las características del trazado, mediante la pendiente longitudinal y las radios de curvatura, características del material móvil, como la masa o los coeficientes aerodinámicos. Y características de la explotación ferroviaria como es la velocidad y aceleración del tren en cada instante. El modelo de consumo se basa en el balance de energías que intervienen en el movimiento general del tren. Con todo ello se obtiene la energía necesaria para el movimiento del material móvil.

Todos estos cálculos se discretizan por tramos de condiciones homogéneas y mediante sumatorios de los diferentes subtramos se obtiene la energía total consumida en el tramo a estudio por kilómetro. Cabe reseñar también que todos los sumandos deben ser multiplicados por coeficientes adecuados para conseguir la dimensionalización correcta de las unidades de medida que, en el caso del consumo energético la medida empleada frecuentemente, es el kilovatio-hora (kWh). Además, para poder conocer la energía total requerida de la fuente de energía primaria, debido a que no se dispone de un sistema ideal, se debe calcular las pérdidas en la cadena de tracción, mediante los estándares y coeficientes de rendimiento de los sistemas de tracción.

2.2. Obtención de los datos

Para llevar a cabo el estudio se ha empleado datos de velocidades, aceleraciones y posicionamiento del material móvil en espacios definidos de tiempo, que introducidos en la formulación correspondiente se obtienen resultados de consumo energético y consiguiente coste económico del material móvil para el tramo analizado, objetivo principal del estudio. El intervalo temporal elegido es de un segundo, es decir, para cada segundo del trayecto realizado por el material móvil se ha obtenido los datos necesarios. La recogida de datos se ha llevado a cabo mediante un aparato de posicionamiento GPS con un error menor a 2,5 metros con un sistema DGPS y un error en el valor de la velocidad de $\pm 0,1$ Km/h. Esta precisión está ligada a una correcta recepción de la señal, disminuyendo en zonas donde la intensidad de la señal de transmisión es baja. Los datos proporcionados por el aparato empleados en los cálculos posteriores han sido aquellos relacionados con el posicionamiento terrestre en el formato de longitud y latitud, la velocidad instantánea obtenida en nudos y el tiempo en segundos. Otra información ha sido útil para calificar la bonanza de los resultados obtenidos, como es el número de satélites de referencia en cada medición empleados por el sistema.

Las coordenadas de latitud y longitud son función del elipsoide teórico elegido como referencia, en este caso el WGS-84. Una vez transcritos los valores a una hoja de cálculo se ha realizado las transformaciones adecuadas para obtener las coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), y mediante relaciones trigonométricas, finalmente, el espacio recorrido en cada intervalo de tiempo, un segundo.

$$\Psi = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (II)$$

Con las velocidades en nudos, mediante un cambio de unidades y aplicando la fórmula de integración numérica mediante la regla del trapecio, se ha obtenido una segunda medición de la distancia recorrida en cada intervalo de tiempo. Comparando con las distancias reales obtenidas en los distintos puntos de control, donde se conoce el kilometraje, se ha hecho una estimación del error acumulado en la medición, así como cual de las dos formas de estimación se aproximaba más a la realidad.

Una vez elegido el tipo de dato más fiable para el modelo, conociendo la distancia absoluta, se ha corregido el error apreciado en la medición ajustando el error espacial de manera proporcional a las mediciones realizadas. Para ello se ha empleado una formula de interpolación lineal donde se compara la longitud real del tramo con la suma de las distancias de cada espacio temporal obtenidas de los datos del localizador GPS.

$$l_{i-1} = l_i + \frac{l_T - \sum l_i}{\sum l_i} \cdot l_i \quad (III)$$

Con los valores de la velocidad corregidos se han obtenido, mediante derivación, los valores de la aceleración en cada intervalo de tiempo. Posteriormente se han procesado los resultados obtenidos eliminando aquellos resultados que resultaran incoherentes o fuera de orden. En los tramos en los que la presencia de un túnel han provocado una pérdida significativa de señal, se han obtenido los valores aproximados mediante la fórmula de interpolación lineal con el último dato anterior con señal fiable y el primero posterior. Introduciendo los parámetros geométricos del trazado, así como los valores que definen el avance del material móvil en las formulas de la dinámica del tren para cada espacio temporal, se obtienen los valores de energía requerida y energía disipada en el movimiento de avance del tren en cada instante. Para ello se ha empleado la fórmula:

$$R_a = M \cdot a \cdot cmg + M \cdot g \cdot i + A + B \cdot V + C_T \cdot C \cdot V^2 + R_{ac} \quad (IV)$$

Con esta ecuación se ha obtenido la resistencia al avance del material móvil para cada intervalo de tiempo. Multiplicando la resistencia media entre dos intervalos por la longitud recorrida en dicho espacio temporal, con las correcciones de dimensionalización adecuadas, se obtiene la energía en kWh consumida para cada intervalo.

$$E_i = \frac{(R_{a\ i} + R_{a\ i-1})}{2} \cdot (l_i - l_{i-1}) \quad (V)$$

Realizando el sumatorio de los valores de energía para todo el recorrido se consigue el valor de la energía requerida al sistema de tracción y aquella energía disipada por el sistema de frenado para el tramo de estudio. Añadiendo las características técnicas del motor de tracción en cuanto a poder calorífico y rendimiento motor, se obtiene los litros de combustible diesel necesarios para las condiciones del estudio. Una vez obtenido el consumo total de combustible se multiplica por el precio de mercado, logrando el coste requerido para realizar el servicio en términos energéticos.

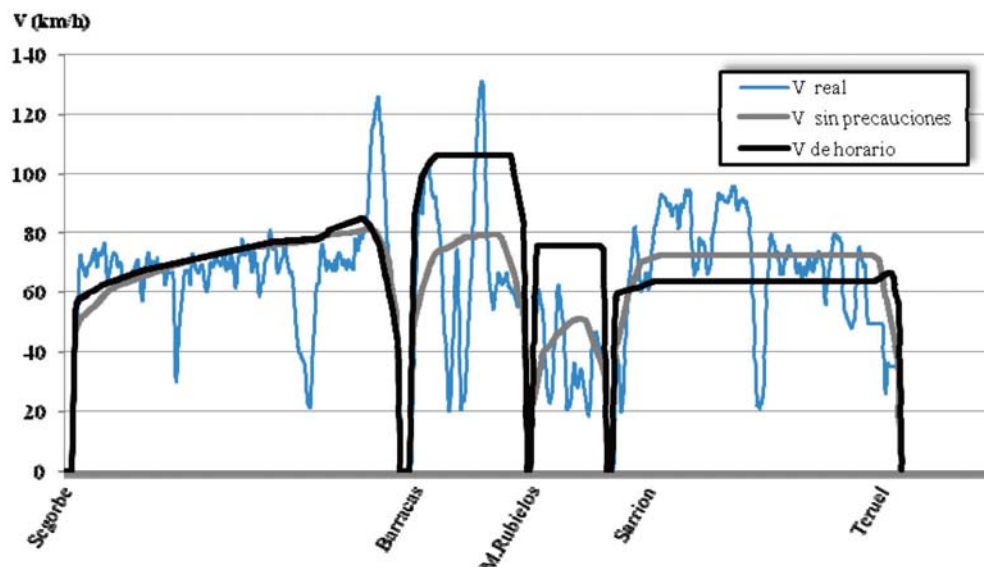
3. Exposición y análisis de los datos

Para establecer una valoración comparativa de diferentes situaciones que pueden reproducirse en la realidad, se ha realizado el análisis de tres escenarios distintos. En el primero se evalúa el coste energético y consiguiente coste económico, de la circulación en condiciones reales del material móvil por el tramo de estudio, a partir de los valores de velocidades y aceleraciones, previo tratamiento de los datos, medidos in situ. El segundo estadio evalúa los costes energéticos en el caso hipotético de la supresión de las precauciones temporales recorriendo el tramo en el mismo tiempo que con la presencia de éstas. Para ello, con los condicionantes de distancia y tiempo establecidos, se han simulado perfiles de velocidades que cumplen con las aceleraciones y deceleraciones habituales de la explotación ferroviaria, y a partir de estos valores de velocidades, se han calculado las aceleraciones correspondientes. Por último, el tercer estadio ha sido desarrollado con la hipótesis de la corrección de los defectos presentes en la vía y consiguiente supresión de las precauciones temporales, pero con la incorporación del condicionamiento temporal de la operación comercial llevada a cabo por la empresa Renfe-Operadora, es decir, cumpliendo el horario comercial establecido por dicha empresa. Como en el segundo estadio, con los condicionantes temporales y espaciales, se han obtenido curvas teóricas de velocidades comerciales.

En la figura 1 se puede apreciar la variabilidad de los valores de la velocidad para el escenario medido in situ en comparación con la tendencia cuasi constante de las curvas teóricas de velocidad de los escenarios con hipótesis de supresión de precauciones temporales. Se observa que el trazo correspondiente con el primer escenario (V real) presenta una gran variabilidad. También se refleja los descensos puntuales de velocidades en los puntos kilométricos donde se sitúan las precauciones, así como picos, que representan un incremento notable de la velocidad para intentar cumplir el horario de servicio, lo que supone un sobre coste energético. Los trazos de los escenarios hipotéticos son mucho más constantes y sin necesidad de desarrollar una velocidad excesiva en el trayecto. Se observa también una velocidad mayor en el tercer escenario (V de horario) debido a la restricción temporal del horario comercial.

La línea de estudio es la línea de media distancia entre Valencia y Zaragoza, en concreto el tramo entre las estaciones de Segorbe (P.K. 238+400) y Teruel (P.K. 132+200) de 106,2 km de longitud. La motivación que ha llevado a la elección de esta línea surge de mejorar la eficiencia económica de ciertos servicios que debido a su baja densidad son poco rentables desde el punto de vista del operador. En este caso en concreto existen diversos puntos conflictivos donde situaciones circunstanciales han provocado defectos en las características geométricas iniciales de la vía y por tanto un sobre coste energético, y económico, en su explotación.

Figura 1. Comparativa de velocidades en los distintos escenarios



La diferencia de cota entre ambos puntos es de 569 metros. El montaje de la vía se dispone sobre plataforma flexible constituida por balasto. La línea está definida con ancho 1.668 mm entre carriles, ancho ibérico, no electrificada con una rampa característica de 24 milésimas (ADIF, 2012). La superestructura está constituida por carril UIC-54 de 54 kg/m y suministrado en barra soldada in situ de 18 m de longitud. La conexión entre dos barras sucesivas se realizó mediante soldadura aluminotérmica proporcionando continuidad longitudinal a la vía. A lo largo del tramo se disponen dos tipos de traviesas, prefabricadas de hormigón bloque y monobloque con un espaciamiento entre ellas de 60 cm y sujeciones elásticas. Las fijaciones elásticas utilizadas para la tipología de traviesa monobloque son de tipo clip Vossloh. La traviesas bloque emplean el sistema de sujeción J2-P2. Bajo la traviesa se dispone de un espesor teórico de balasto entre 25 y 30 cm aunque dependiendo de las características particulares de cada tramo puede llegar, excepcionalmente, hasta un metro de espesor. El hombro de la banqueta de balasto es de 0,90 m y el talud 5H:4V. El balasto a emplear es silicio de tipo “2”, con Coeficiente de Desgaste Los Ángeles no superior al 15%. La pendiente transversal es de un 5% salvo en aquellas secciones en las que no apoya sobre la capa de subbalasto, es decir, en el caso de pasos a distinto nivel que se hace directamente sobre una capa de mortero de nivelación.

El material rodante con el que se opera los servicios de la línea es el denominado Renfe serie 599. La composición de dicha serie se basa de tres coches automotores diesel, de longitud cercana a los 76 metros y un peso de 157 toneladas, que pueden desarrollar una velocidad máxima de 160 km/h. Está compuesto por tres cajas, de distribución Motor-Remolque-Motor. Cada coche motor está dotado con dos bogies presentando cuatro motores en total. Los motores de tracción diesel del modelo MAN D2876 LUE 623 con una potencia nominal de 382 kW cada uno pudiendo desarrollar una potencia total de 1528 kW (Alonso, 2005).

El análisis se ha llevado a cabo por servicio y sentido. Una vez realizado el estudio por separado se ha incluido un servicio por sentido para evaluar el coste teórico de un recorrido donde coincide el punto de partida con el final. En la presentación de resultados se obtiene cuatro tipos de resultados:

- Requerimiento energético en términos de kWh, siendo estas las unidades estandarizadas de consumo energético.
- Consumo del sistema de tracción en litros de combustible diesel.
- Coste económico de la cantidad de combustible diesel empleado.
- Energía disipada por el sistema de frenado

Este último dato no se puede estandarizar en términos económicos, aunque supone una medida útil para evaluar la eficacia de la gestión de desarrollo energético del sistema tractor, así como aporta un baremo de estimación del desgaste del sistema de frenado.

Para obtener los valores de consumo y coste económico totales extrapolados de manera anual, se ha tenido en cuenta el número de servicios semanales comerciales de viajeros. La comunicación entre las estaciones de Valencia y Zaragoza consta de cuatro servicios diarios por sentido los siete días de la semana. Dispone, a su vez, de un servicio de mercancías que comunica el puerto de la ciudad de Valencia con Zaragoza dos veces por semana en ambos sentidos.

Escenario 1: Marcha en condiciones reales del material móvil.

En este escenario se ha tenido en cuenta las condiciones actuales de servicio y sus limitaciones. Es decir se han tenido en cuenta las limitaciones temporales existentes en el tramo de estudio.

En la tabla 1 se presenta los datos de coste energético y su correspondiente coste económico. Se aprecia un mayor consumo energético en el tramo Segorbe-Teruel debido al perfil longitudinal del trazado. Es decir, al ser un trazado característico de subida con rampas, el sistema de tracción debe realizar mayor esfuerzo de tracción y por tanto aumenta el consumo. En el tramo Teruel-Segorbe la energía disipada por el sistema de frenado es, lógicamente, mayor, debido a la presencia de pendientes favorables a lo largo de todo el trazado.

Tabla 1. Consumo energético y económico del escenario 1. Elaboración propia

	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Ud
Consumo total	702,83	602,31	1305,15	kWh
Consumo gasóleo	220,49	188,96	409,45	L
Coste	138,91	119,04	257,95	€
Energía disipada	279,29	438,03	717,32	kWh

Escenario 2: Marcha con la hipótesis de supresión de las precauciones temporales.

Partiendo de la supresión de las precauciones temporales y con curvas teóricas de velocidades se obtienen datos hipotéticos sobre la marcha del material móvil y consiguiente consumo. La presencia de precauciones temporales puede acarrear un incumplimiento en el horario comercial. De ahí la motivación de evaluar este escenario y obtener la variación de consumo. Para los cálculos, se ha tenido

en cuenta el mismo tiempo de trayecto del medido in situ en las labores de campo. En la tabla 2 se recogen todos los resultados de consumo obtenidos bajo esta hipótesis.

Tabla 2. Consumo energético y económico del escenario 2. Elaboración propia

	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Ud
Consumo total	559,00	328,30	887,29	kWh
Consumo gasóleo	175,37	102,99	278,36	L
Coste	110,48	64,89	175,37	€
Energía disipada	144,30	153,43	297,74	kWh

Escenario 3: Marcha sin precauciones temporales cumpliendo el horario comercial.

En este caso se plantea la evaluación de los costes derivados del consumo energético con las condiciones de estado óptimo de la vía y el cumplimiento del horario propuesto por la operadora. El tiempo de trayecto completo no difiere mucho del empleado en el escenario 2, pero los condicionantes temporales derivados de las paradas comerciales intermedias causan que, en ciertos tramos la velocidad sea superior para cumplir el horario comercial. Esto provoca que el coste requerido en este escenario sea superior al obtenido en el escenario 2. El horario comercial propuesto para el trayecto Segorbe-Teruel es de una hora y treinta y tres minutos y para el trayecto Teruel-Segorbe es de una hora y treinta y un minutos.

Tabla 3. Consumo energético y económico del escenario 3. Elaboración propia

	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Ud
Consumo total	576,97	333,02	909,99	kWh
Consumo gasóleo	181,01	104,47	285,48	L
Coste	114,04	65,82	179,85	€
Energía disipada	161,97	179,32	341,28	kWh

Una vez finalizado el análisis de manera separada, se ha realizado una comparativa entre las diferentes alternativas, evaluando el incremento de gasto energético y económico entre la situación real actual y las posibles situaciones futuras tras las actuaciones propuestas. En la primera comparativa se analiza el decremento de costes después de la realización de las actuaciones propuestas para el mismo coste temporal. La diferencia de gasto asciende hasta la cantidad de 82,59 € por servicio, lo que supone un 32% de ahorro sobre el consumo actual. En la segunda comparativa se analiza el decremento introduciendo el condicionante del cumplimiento del horario propuesto por la empresa operadora. En este caso el ahorro económico es de 78,10 € lo que supone una variación porcentual del 30.3%. En la tabla 4 se realiza una comparativa de los escenarios dos y tres, donde hipotéticamente se han eliminado las precauciones, respecto a las mediciones realizadas. En esta tabla se ha añadido la diferencia de coste en términos anuales. Para ello se ha tenido en cuenta los servicios semanales en el tramo, y se han extrapolado a términos anuales. Esto arroja una diferencia económica de 128.800 euros en la primera comparación, lo que supone una disminución de alrededor de un 30% del gasto

actual y un ahorro en la energía disipada de 420 kwh por servicio, lo que supone cerca del 55% de la energía disipada actualmente. Para la segunda comparativa, los valores absolutos son ligeramente inferiores pero prácticamente iguales en términos porcentuales.

Tabla 4. Comparativa de costes de los distintos escenarios. Elaboración propia

	Comparativa escenario 1 con el escenario 2			Comparativa escenario 1 con el escenario 3			
	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Segorbe-Teruel	Teruel-Segorbe	Total	Ud
Consumo total	143,84	274,02	417,85	125,86	269,29	395,15	kWh
Consumo gasóleo	45,12	85,96	131,09	39,48	84,48	123,97	l
Coste	28,43	54,16	82,59	24,88	53,22	78,10	€
Energía disipada	134,98	284,60	419,58	117,32	258,71	376,04	kWh
Coste anual	44.347,91	84.485,58	128.833,49	38.805,41	83.030,09	121.835,50	€

Una vez analizado el efecto económico que supone la corrección de los defectos causantes de las precauciones, se analiza el coste de dichas actuaciones así como la posible amortización y viabilidad económica de las obras a realizar. Para ello se han propuesto unas posibles actuaciones que enmienden la problemática existente y se ha realizado una estimación del gasto económico que implicarían. Todas las actuaciones propuestas parten de la premisa de la corrección puntual del defecto y no se plantea la posibilidad de modificar las características geométricas de la vía ni el trazado original. Los tramos de análisis vienen dados por las prevenciones temporales publicadas por la empresa que administra la infraestructura (ADIF, 2012). Tras recopilar información al respecto y realizar una inspección ocular en la infraestructura, se han podido identificar las diversas causas que han provocado los desperfectos en la infraestructura. Para una mayor simplicidad en el análisis se han agrupado aquellas limitaciones que hayan sido ocasionadas por la misma causa generalizando la actuación a desarrollar. En total existen nueve precauciones temporales repartidas a lo largo del tramo, una vez realizado un primer análisis se ha concluido que las actuaciones de los nueve defectos pueden agruparse en cuatro tipologías distintas. Para cada tipo de actuación se analiza las posibles causas que ocasionan el defecto, el proceso constructivo de la actuación en sí, así como una estimación cuantitativa del coste económico de la actuación.

La valoración de la viabilidad de las actuaciones parte de la amortización de las obras a realizar cuya finalidad es mantener el estado óptimo de los componentes de la infraestructura. La finalidad es poder operar el servicio en las mejores condiciones y en términos considerables de eficiencia. Para conseguir el estado óptimo de la infraestructura se proponen una serie de actuaciones que conllevan una serie de costes. Para el tramo en concreto de estudio se expone el presupuesto conjunto de las distintas actuaciones.

Tabla 5. Presupuesto, en euros, de las actuaciones a realizar. Elaboración propia

Actuación 1.	Corrección de drenaje ineficaz	232.566,00
Actuación 2.	Corrección cambio de estado del terraplén	2.800,00
Actuación 3.	Corrección defecto aparato de vía	51.805,00
Actuación 4.	Cambio elementos de la vía dañados	149.923,00
Presupuesto de ejecución material		437.094,00

Una vez obtenido el presupuesto de ejecución material, debe calcularse el gasto general y el beneficio industrial, así como gravarlo con la tasa de imposición material correspondiente. Con todo ello, y debido a que se trata de una estimación orientativa del coste que tendrían las actuaciones propuestas alcanzaría un montante de 635.000 euros.

Finalizado el estudio de los defectos causantes de las precauciones y su posible coste, se puede concluir, que el sobre coste anual, en términos energéticos, es de alrededor de unos 125.000 euros, lo que se puede calificar como significativo, sobre todo teniendo en cuenta que los valores del consumo obtenidos se han visto disminuidos por la simplificación de los cálculos mediante el empleo del valor de rendimiento medio del sistema de tracción, ya que los valores de rendimiento son inferiores a bajas velocidades, con lo que en presencia de los tramos de las limitaciones temporales de velocidad el rendimiento sería menor del empleado y por tanto el consumo requerido mayor. También cabe destacar que existe una reducción considerable del coste energético en los escenarios bajo la hipótesis de la supresión de las precauciones temporales. Esta reducción es de un 30% en el coste de la energía consumida y de hasta un 55% en el valor de la energía disipada, esta última no evaluable en términos económicos. Debido a que el coste, orientativo, de la corrección de los deterioros presentes alcanza un total de 635.000 €, esta corrección equivale a los sobre costes energéticos por la presencia de las precauciones temporales durante 5 años. Es decir, si no se realizara ninguna actuación, se invertiría el mismo dinero en sobregasto energético en un periodo igual a 5 años. Por último, la posibilidad de evaluar y desarrollar aquellas actuaciones que proporcionan un ratio coste/beneficio mayor, genera nuevas posibilidades de gestión y optimización de las infraestructuras ferroviarias.

4. Conclusión

En el presente estudio se ha planteado el sobre coste energético producido por la presencia de precauciones temporales en la vía. Estas precauciones están provocadas por defectos en la infraestructura y condicionan de manera notable la explotación de los servicios debido a que limitan la velocidad máxima de circulación en el tramo afectado. Su influencia en el consumo energético es a considerar ya que el término de velocidad instantánea y, en mayor medida, su variación tiene un peso clave en dicho consumo.

El análisis llevado a cabo para un tramo concreto de la línea ferroviaria entre Valencia y Zaragoza se ha fundamentado en la obtención de los datos de consumo in situ del material móvil realizando un estudio comparativo con diferentes hipótesis de circulación donde han sido eliminadas las precauciones temporales. Con ello se pretende que la variación de consumo energético obtenida sea causa única y

exclusivamente de la presencia de dichas precauciones y no de otros factores fuera del foco de este estudio. Con todo ello los resultados obtenidos arrojan que la corrección de los defectos presentes en la infraestructura y consiguiente supresión de las precauciones temporales conllevaría un ahorro económico del orden del 30% del coste por consumo energético actual. Cabe añadir que la energía disipada por el sistema de frenado se vería reducida hasta en un 55% en el tramo estudiado. Por último se ha realizado una evaluación sobre las causas que han desencadenado los defectos en la infraestructura planteando unas posibles soluciones que subsanen dichos defectos. El montante al cual asciende la posible ejecución de las soluciones planteadas es un valor orientativo de alrededor de 635.000 euros.

Con toda la información recopilada y los resultados obtenidos en el estudio realizado se puede concluir que, bajo ciertos condicionantes, la rehabilitación del estado óptimo de la infraestructura es una posibilidad económicamente viable. Esto supone una mejora del servicio prestado así como un valor añadido al conjunto del sector ferroviario. En el caso de estudio el montante invertido en la ejecución de las actuaciones equivale a 5 años de circulación eficiente del material móvil sin precauciones temporales existentes en la infraestructura. Valorar si dicho periodo es aceptable es una cuestión de prioridades y objetivos del ejecutor, pero como referencia se puede comparar con periodos de amortización de obra civil de nueva construcción concluyendo que no está fuera del orden de magnitud. Por otro lado hay que tener en cuenta los beneficios intangibles generados como el caso de la energía disipada por el sistema de frenado, que tiene una influencia directa en el desgaste y mantenimiento de dichos sistemas. La disminución de consumo energético, con las últimas normativas de penalización a empresas que superen ciertos baremos de balances energéticos, supone una ventaja económica indirecta difícil de cuantificar.

Referencias

- ADIF (2012) Actualización de la declaración de la red.
- Alonso Mostaza, J.C (2005) Unidades basculantes serie 598.
- Campos Méndez, J., De Rus Mendoza, G. (2009). El transporte ferroviario de Alta velocidad: Una visión económica. *Fundación BBVA*
- Fundación CETMO (2005). El transporte en España, un sector estratégico: Informe sobre la aportación y sus retos futuros.
- Fuertes López, M. (2005). Privatización y liberación en el sector de los transportes. *Revista de derecho de la Unión Europea*
- García Álvarez, A. (2006). Gestión energética en el ferrocarril. *Máster en sistemas ferroviarios. Universidad Pontificia de Comillas*.
- García Álvarez, A. (2007). Dinámica de los trenes en alta velocidad. *Explotación técnica y económica de ferrocarriles*.
- García Álvarez, A. et Martín Cañizares, M^aP. (2007). Estandarización de los consumos energéticos y emisiones de los trenes de viajeros. *Investigación FFE. Fundación de Ferrocarriles Españoles*

García Álvarez, A. et Martín Cañizares M^aP. (2008). Consumo y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril. *Monográfico 16 Enertrans*

García Álvarez, A. (2009) Energía y trazado ferroviario. *Investigación FFE. Fundación de Ferrocarriles Españoles.*

Levinson, D. et Mathieu, J.M (1997). The full cost of high speed rail: An engineering Approach. *The Annals of Regional Science*

López Pita, A. (2008). Explotación de líneas de ferrocarril. *Universidad Politécnica de Barcelona UPC.*

López Martínez, J. M., Sánchez Alejo, J. (2008). Consumo de energía y emisión es asociadas a la construcción y mantenimiento de vehículos. *Monográfico 11 Enertrans*

Martínez Aguado, T., Ruíz Rúa, A., Muro Rodríguez, A.I (2008). Modelos de consumo y emisiones en el transporte: Estado del arte. *Monográfico 3 Enertrans*

Renfe - Operadora (2009). Informe anual.

Nueva red ferroviaria del corredor del Mediterráneo

New rail network for the Mediterranean corridor

Joan Saura Serrat

Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Master en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica
Universidad Politécnica de Catalunya

Resumen

Partiendo de la red ferroviaria actual en el Corredor del Mediterráneo y de las planificaciones existentes, se analizan sus deficiencias y se diseña de forma completa una nueva red ferroviaria. Esta nueva red cumple con los estándares europeos de interoperabilidad, permitiendo resolver todos los conflictos actualmente existentes en la red ferroviaria española entre la frontera francesa y la frontera portuguesa, tanto para el modo viajeros como para el modo mercancías. Además, se plantean los pasos necesarios para desarrollar de forma ordenada la nueva red, según el volumen de la demanda existente en los distintos itinerarios estudiados.

Palabras clave: Corredor Mediterráneo, Interoperabilidad, Alta velocidad, Planificación de infraestructuras, Efecto Red.

Abstract

The project starts with an analysis of the existing railway network in the Mediterranean corridor. Combining the present state with the existing planning, all shortcomings detected are analyzed. Knowing the European standards for interoperability, a new rail network is designed in order to solve all the existing conflicts in the Spanish net between the French and the Portuguese border, both for high speed and freight traffic. In addition, the study proposes the necessary steps in order to develop the new network, considering the traffic demand in all the different itineraries studied.

keywords: Mediterranean Corridor, Interoperability, High speed, Infrastructure planning, Net effect.

1. Introducción

Previamente a la redacción de este estudio ha habido muchos otros que han propuesto soluciones distintas para resolver el problema del corredor. Independientemente de los trazados, los nudos y los puntos de acceso a la red, todos gravitan alrededor el mismo concepto: coser y parchear las discontinuidades existentes en la red ferroviaria actual alrededor del Mediterráneo, para crear un corredor continuo entre sus dos extremos: Algeciras y la Frontera Francesa. No obstante, el desarrollo de la nueva red de alta velocidad y las ampliaciones de los núcleos de cercanías han añadido una nueva dimensión a la red, influyendo directamente en la funcionalidad y la estructura futura del Corredor Mediterráneo.

Este estudio aborda la resolución del Corredor del Mediterráneo desde una óptica más extensa, incluyendo en su estudio todas las variables de transporte y planificación posibles. Desde el primer momento se parte del concepto de un corredor Mediterráneo extendido más allá de Algeciras, llegando desde la frontera hasta la frontera portuguesa, discurriendo por todo el litoral del este y del sur de España, conectando sus principales capitales, puertos y centros logísticos. Gracias a esta visión global se logra plantear una solución de gran coherencia y con potencialidad y capacidad de respuesta adecuadas a las características del territorio por el que discurre.

Tabla 1. Datos demográficos del Corredor Mediterráneo

Concepto	Valor respecto del total nacional
Superficie atendida	22,75%
PIB generado	45%
Población residente	43,69
Volumen de viajes turísticos	45%

Revisados los datos demográficos (Ver Tabla 1), es importante mencionar las cifras referentes al reparto modal ferrocarril-carretera en el transporte de mercancías dentro del corredor. Por lo general, los datos obtenidos ponen de manifiesto un dominio completo del modo carretero frente al ferroviario. Los puertos españoles carecen de buenos acceso ferroviarios, existiendo incluso algunas instalaciones sin conexión a la red. Además, existen importantes deficiencias a nivel de infraestructura a lo largo de las líneas que forman el Corredor, traducándose ello en una baja utilización del modo ferroviario para las mercancías.

En lo referente al tráfico de viajeros, el estudio evalúa la necesidad de construir una línea de alta velocidad a lo largo de todo el corredor. Partiendo de los datos existentes en diferentes estudios previos, se obtienen demandas importantes muy significativas a lo largo de todo el corredor. De hecho, el sector Este arroja una demanda total de 13,5 millones de viajes anuales, mientras que el sector Sur prevé una demanda aún mayor, de 14 millones al año¹.

¹ Datos obtenidos del Estudio del Corredor ferroviario del Mediterráneo publicado por el Ministerio de fomento en 2011 y por el Estudio informativo del Eje ferroviario Transversal de Andalucía.

Tabla 2. Reparto modal en los puertos mediterráneos

Puerto. Millones de toneladas totales/año (Incluido transbordo marítimo y cabotaje)	T/año por carretera	T/año por FFCC
Algeciras: 74,77	14.260.000	530.000
Valencia: 59,8	33.210.000	710.000
Barcelona: 51,8	32.850.000	510.000
Tarragona: 36,0	9.870.000	2.000.000
Escombreras: 25,7	6.830.000	571.000
Málaga: 6,4	3.600.000	540.000
Castellón: 5,73	5.730.000	0
Carboneras: 5,3	5.300.000	0
Sevilla 4,35	4.000.000	356.000
Cádiz: 3,7	3.700.000	0
Alicante: 3,56	3.440.000	120.000
Motril: 2,5	1.970.000	0
Almería: 1,6	2.000.000	0

Tabla 3. Demanda terrestre de transporte de mercancías en el arco mediterráneo.

Relación	Millones de toneladas/año
Sector Este	283
Sector Sur	59
Relaciones internacionales	27
Relaciones pasantes	38

1.1. Metodología

Dada la gran complejidad de la problemática a estudiar y su gran extensión geográfica, se plantea una metodología basada en 4 fases diferenciadas:

- FASE 1: Evaluación de las deficiencias existentes en la red actual.
- FASE 2: Diseño del paso del Corredor por las distintas áreas metropolitanas que atraviesa.
- FASE 3: Diseño de los encaminamientos de largo recorrido entre áreas metropolitanas.
- FASE 4: Planificación de implantación del Corredor, mediante un sistema de secuencial por fases.

En puntos sucesivos se expondrán los contenidos más relevantes de cada una de estas fases.

1.2. Objetivos

La metodología empleada ha permitido abordar de forma satisfactoria los objetivos del proyecto, que son los siguientes:

- Diseñar una nueva red ferroviaria que se apoye en la existente y optimice los recursos de infraestructura actuales.
- Diseñar una nueva red ferroviaria que garantice el acceso en ancho internacional a los principales puertos del Mediterráneo Español y del Atlántico sur.
- Diseñar una nueva red ferroviaria completamente interoperable, permeable a cualquier tipo de tráfico de viajeros o mercancías procedente del resto de España y Europa.
- Dar cobertura, mediante un nuevo ferrocarril de alta velocidad, a las principales capitales del Mediterráneo que cuenten con suficiente demanda como para requerir tal servicio.
- Plantear una nueva red altamente sostenible, de desarrollo paulatino en el tiempo, que satisfaga y cumpla con las planificaciones existentes, revisando aquellos trazados y soluciones que actualmente se encuentren incompletas.

El estudio genera una solución integral, única y completa para todo el Corredor en su conjunto. Se tienen en cuenta todos los tipos de tráfico existentes en la franja mediterránea, además de las planificaciones actualmente aprobadas. Las soluciones planteadas completan los planes de desarrollo existentes, llegando a corregirlos en algunos tramos, fundamentalmente por deficiencias a nivel de capacidad y homogeneidad. En general se trata de un gran ejercicio de trazado, planificación y organización de la red ferroviaria existente, con el fin de transformarla en una nueva red altamente eficiente y perdurable en el tiempo.

2. Análisis del estado actual.

El estudio arranca con un análisis del estado de la red ferroviaria mediterránea en la actualidad.

Para evaluar la red se estudian diferentes parámetros que definen sus características: tipología de líneas, rampa característica por tramos, longitud máxima de trenes de mercancías, tipología de electrificación y capacidad sobrante. El objetivo de esta primera fase es determinar cuáles son los puntos y tramos más conflictivos de la red ferroviaria mediterránea.

En primer lugar, partiendo de los datos suministrados por la Declaración de la Red del ADIF se elabora el Mapa general de Discontinuidades. En él, se pueden observar los principales saltos de continuidad a nivel de infraestructura que existen entre las diferentes líneas que hay actualmente en servicio en el litoral Mediterráneo Español.

En segundo lugar, a partir de los datos de suministrados por Renfe Operadora se analiza la capacidad ferroviaria sobrante en todas las líneas actualmente vinculadas al Corredor. Se calcula su capacidad máxima según su infraestructura y sistemas de bloqueo y se compara con el número de trenes actualmente en gráfico. Este análisis se completa con el valor de la carga máxima remolcable en función de la rampa característica y del tipo de tracción utilizada en cada línea estudiada.

Este análisis del estado de la red permite identificar las principales deficiencias que afectan a la competitividad del transporte ferroviario español.

Tabla 4. Estado actual de la infraestructura ferroviaria.

Tramos de mayor saturación.

Línea	Tramo	Capacidad sobrante
Barcelona – Girona – Portbou	Mollet – Granollers	4%
Barcelona – Vilanova – SVC	Sants – Castelldefels	8%
Tarragona – Castellón	Tarragona – Vandellós	16%
Valencia – La Encina	Valencia – Silla	3%
Alicante – Murcia	Alicante – Murcia	6%
Utrera – Cádiz	Utrera – Cádiz	7%

Tabla 5. Estado actual de la infraestructura ferroviaria.

Rampa característica y longitud máxima de ternes de mercancías.

Línea	Rampa característica y Lmax
Barcelona – Vilanova – SVC	27 ‰. 450m
Linares – Moreda	23 ‰. 450m
Moreda – Almería	28 ‰. 430m
Moreda – Granda – Bobadilla	27 ‰. 360m
Bobadilla – Algeciras	24 ‰. 500m
Bobadilla – Utrera	22 ‰. 400m
Utrera – Sevilla	22 ‰. 450m
Córdoba – Bobadilla	20 ‰. 500m
Córdoba – Sevilla	19 ‰. 550m

Tabla 6. Estado actual de la infraestructura ferroviaria.

Puntos de rotura de tracción.

Estación	Características
Alicante Termino	Fin tracción eléctrica dirección Murcia
Chinchilla	Fin tracción eléctrica dirección Murcia
Linares-Baeza	Fin tracción eléctrica dirección Moreda
Huéneja - Dolar	Fin tracción eléctrica dirección Moreda
Bobadilla	Fin tracción eléctrica dirección Granada y Algeciras
Roda	Fin tracción eléctrica dirección Sevilla
Utrera	Fin tracción eléctrica dirección Roda
Huelva	Fin tracción eléctrica dirección Mérida

Las conclusiones más importantes son las siguientes:

- La red mediterránea se puede dividir en dos mitades, desde la frontera francesa hasta la Encina y desde La Encina hasta la frontera portuguesa.
- La primera mitad está formada, casi en su totalidad, por líneas de doble vía de ancho ibérico electrificadas a 3KV DC.
- La principal discontinuidad existente en esta primera mitad es la vía única entre Tarragona y Vandellós, cuyas obras de desdoblamiento llevan años detenidas. Este tramo de vía única afecta de forma muy negativa a los tiempos de viaje entre Barcelona y Valencia.
- El ancho internacional actual en este tramo va desde Tarragona a la frontera francesa. Desde Mollet hacia el norte permite el tráfico de mercancías, desde Mollet hacia el sur es una LAV pura de viajeros dirección Barcelona, circulando los mercantes por una línea convencional de ancho mixto que conecta la LAV con el puerto.
- La mitad sur de la red, entre La Encina y Huelva, está formada en su práctica totalidad por líneas de vía única no electrificadas.
- Las LAV existentes en la mitad sur de la red son todas de tráfico exclusivo de viajeros.
- Las líneas convencionales presentan rampas características muy elevadas, superiores en la mayoría de los casos a las 18 milésimas.

En general se observa una red muy poco homogénea, cuyas dos mitades se encuentran prácticamente desconectadas entre sí debido al cierre en 1985 de la línea Almendricos-Guadix. Esto provoca que cualquier relación entre el sur y el este del corredor se tenga que hacer vía Alcázar de San Juan y el puerto de Despeñaperros, añadiendo unos 400km al recorrido original además de la inversión de marcha en Alcázar.

A nivel de tráfico, los ejes más cargados se concentran alrededor de las áreas metropolitanas de Barcelona y Valencia, dónde el elevado tráfico de cercanías complica de forma muy importante la circulación de trenes de largo recorrido y de mercancías (Ver Tabla 4). Por lo general, fuera de estas líneas, el resto de ejes se encuentran descargados o incluso muy descargados, con capacidades sobrantes superiores al 80%.

4. Análisis de áreas metropolitanas

Una vez analizada la demanda existente en el corredor y sus principales deficiencias, se inicia el proceso de desarrollo de soluciones. La segunda fase del estudio consiste en analizar las distintas áreas metropolitanas por las que discurre el corredor y diseñar una solución que cumpla, a la vez, con todos los objetivos planteados en el proyecto. Para ello se han seguido los siguientes criterios:

- Se ha realizado un estudio detallado del estado actual de las RAF's de cada área metropolitana.
- Se han estudiado y analizado las planificaciones vigentes de todos los vectores de transporte

implicados: posición de aeropuertos, accesos a puertos, desarrollo de instalaciones logísticas y polígonos industriales, expansión y modernización de núcleos de cercanías y construcción de nuevas líneas de alta velocidad.

- Siempre que ha sido posible, se han respetado las planificaciones existentes. En la mayoría de casos, estas planificaciones se han mejorado o corregido para adaptarlas a las necesidades impuestas por el Corredor Mediterráneo a nivel de interoperabilidad de tráfico y capacidad de red.

Las soluciones desarrolladas permiten, en todos los casos, evitar el paso de trenes de mercancías y de trenes de alta velocidad sin parada por las estaciones centrales de cada área metropolitana. Se plantean soluciones compatibles con el acceso a los distintos puertos y aeropuertos del mediterráneo, generándose en todos los casos variantes y by-pases para evitar inversiones de marcha y cambios de tracción innecesarios. Se especializan los canales de acceso a las distintas ciudades segregando los tráficos de cercanías de los de largo recorrido y mercancías. En algunos casos, como en Barcelona y Tarragona, se plantea la recuperación de líneas e instalaciones ferroviarias actualmente en desuso, como puede ser la línea Reus-Roda.

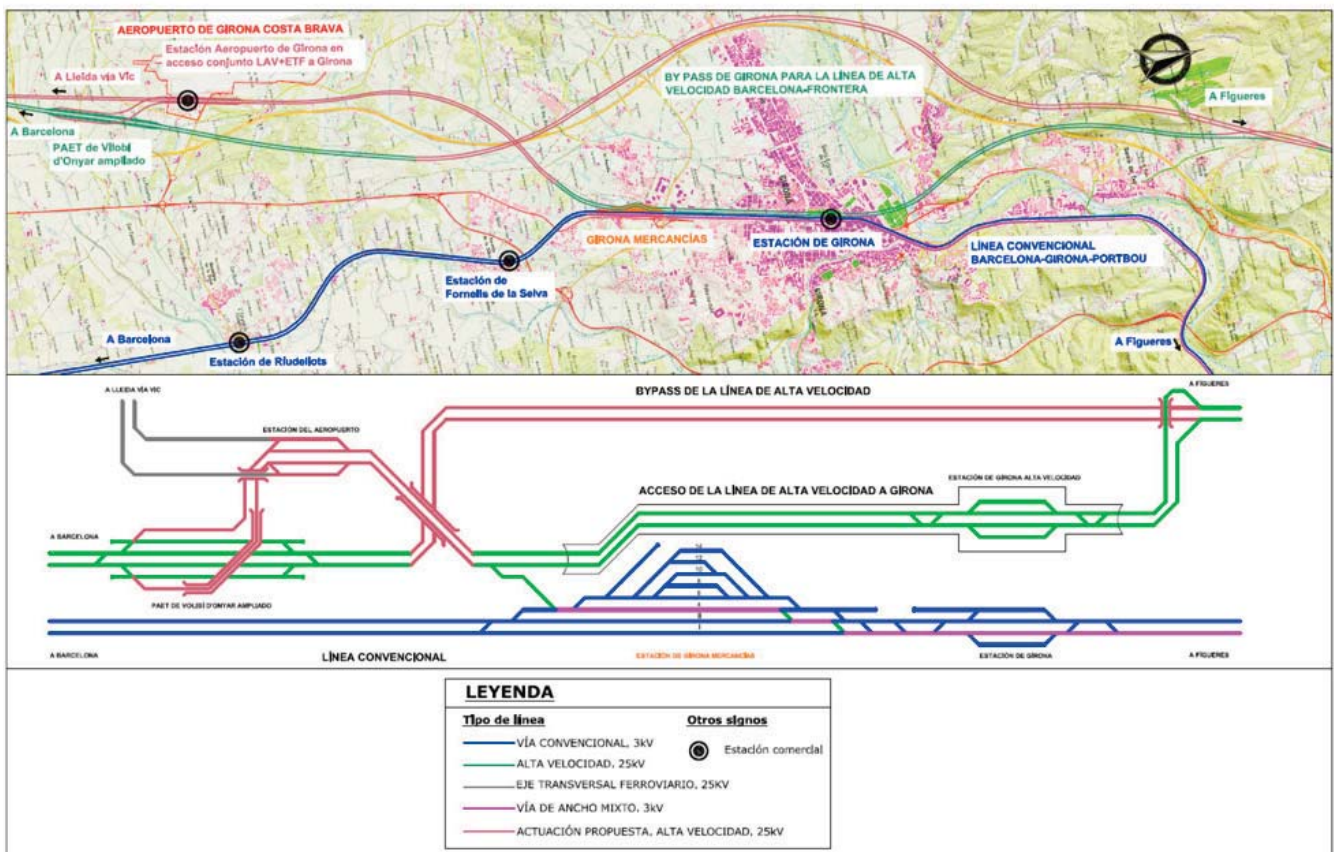


Fig. 1. Solución propuesta para la ciudad de Girona.

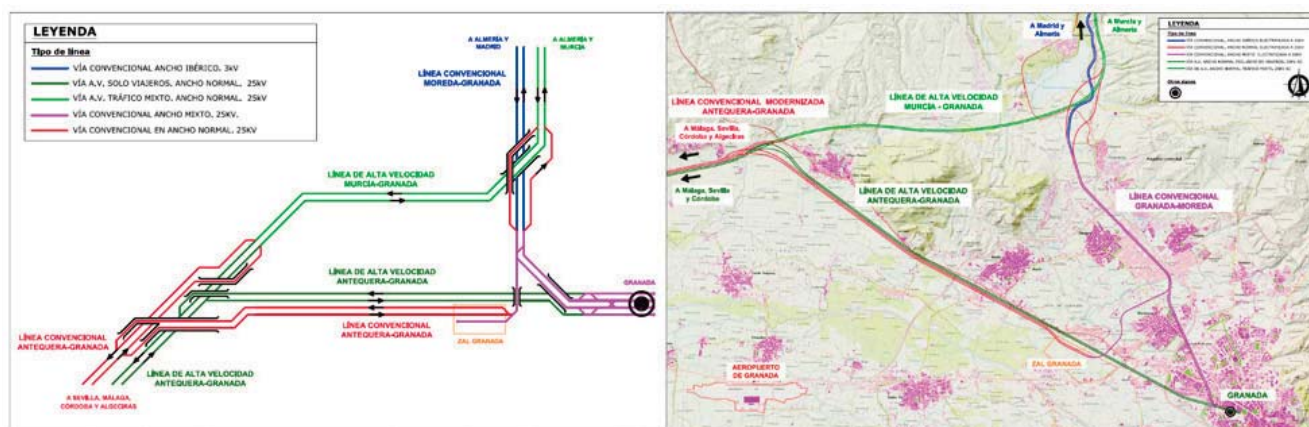


Fig. 2. Solución propuesta para la ciudad de Granada.

4. Análisis de conectividad global.

Resuelto el paso por las diferentes áreas metropolitanas se aborda el estudio de las líneas entre ellas. Se analizan todos los tramos y líneas existentes y planificadas en el corredor, determinando en cada caso qué solución es más adecuada para garantizar la continuidad del mismo. Las soluciones diseñadas contemplan todas las necesidades planteadas por el Corredor, respetando los tramos actualmente en construcción y mejorando y corrigiendo las deficiencias existentes en la planificación actual. El resultado es la nueva red ferroviaria del Corredor del Mediterráneo, cuyas características fundamentales se describen a continuación.

La primera cualidad de esta nueva red es que prioriza los tráficos en ancho internacional y corriente alterna en el interior del corredor. Ello significa que existen tramos en los cuales el encaminamiento directo entre capitales o entre puertos se restringe únicamente a parámetros de tráfico internacional. A su vez, la nueva configuración de líneas permite el acceso de trenes de ancho ibérico a todos los puertos y capitales del litoral español, usando las líneas convencionales actuales.

En segundo lugar, viendo la demanda existente en los itinerarios de largo recorrido, se plantea que todos aquellos tramos de alta velocidad de nueva construcción sean aptos para tráfico mixto. Esta decisión responde al criterio de maximización de la inversión en infraestructura.

La tercera característica fundamental de la nueva red es su relación con las líneas existentes y el máximo aprovechamiento que efectúa de las mismas. A partir de los análisis de tráfico y de las necesidades a nivel de continuidad y encaminamientos, se solucionan los distintos tramos mediante la combinación de la modernización y la construcción de nuevas líneas. Así, aquellas líneas convencionales de naturaleza troncal por las que no se prevé la circulación de trenes de ancho ibérico, se transforman en líneas de ancho internacional interoperables según los parámetros europeos. La modernización de estas líneas permite el aprovechamiento de su trazado y la segregación, en todos los casos, de los tráficos de mercancías de los de largo recorrido en ancho internacional. A su vez, aquellas líneas de carácter radial por las que se prevé la circulación de trenes en ancho ibérico con destino el centro de la península, se modernizan mediante el montaje de vía de ancho mixto. Finalmente, se plantea la construcción de nuevas líneas exclusivas para tráfico de mercancías en aquellas relaciones cuyo nivel de tráfico así lo recomienda.

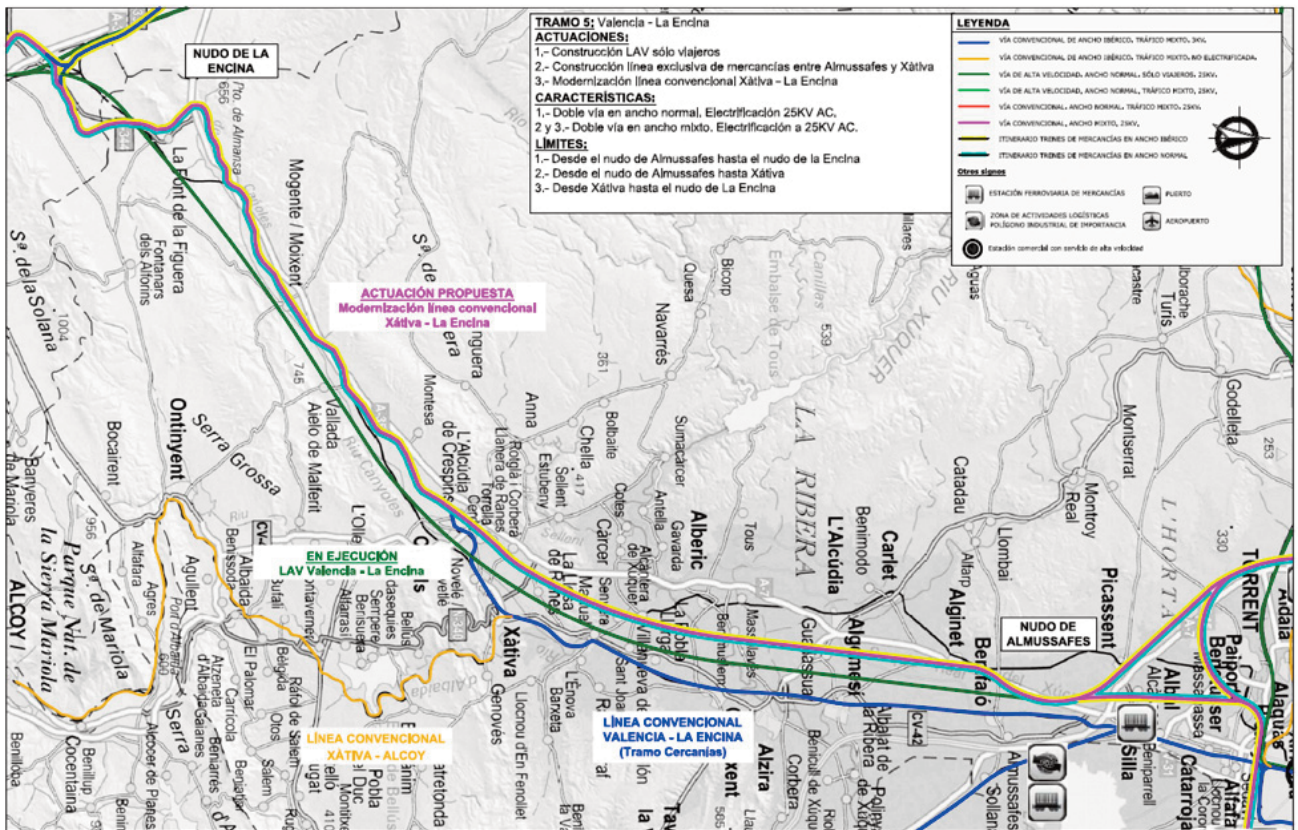


Fig. 3. Solución propuesta para el tramo entre Valencia y La Encina.

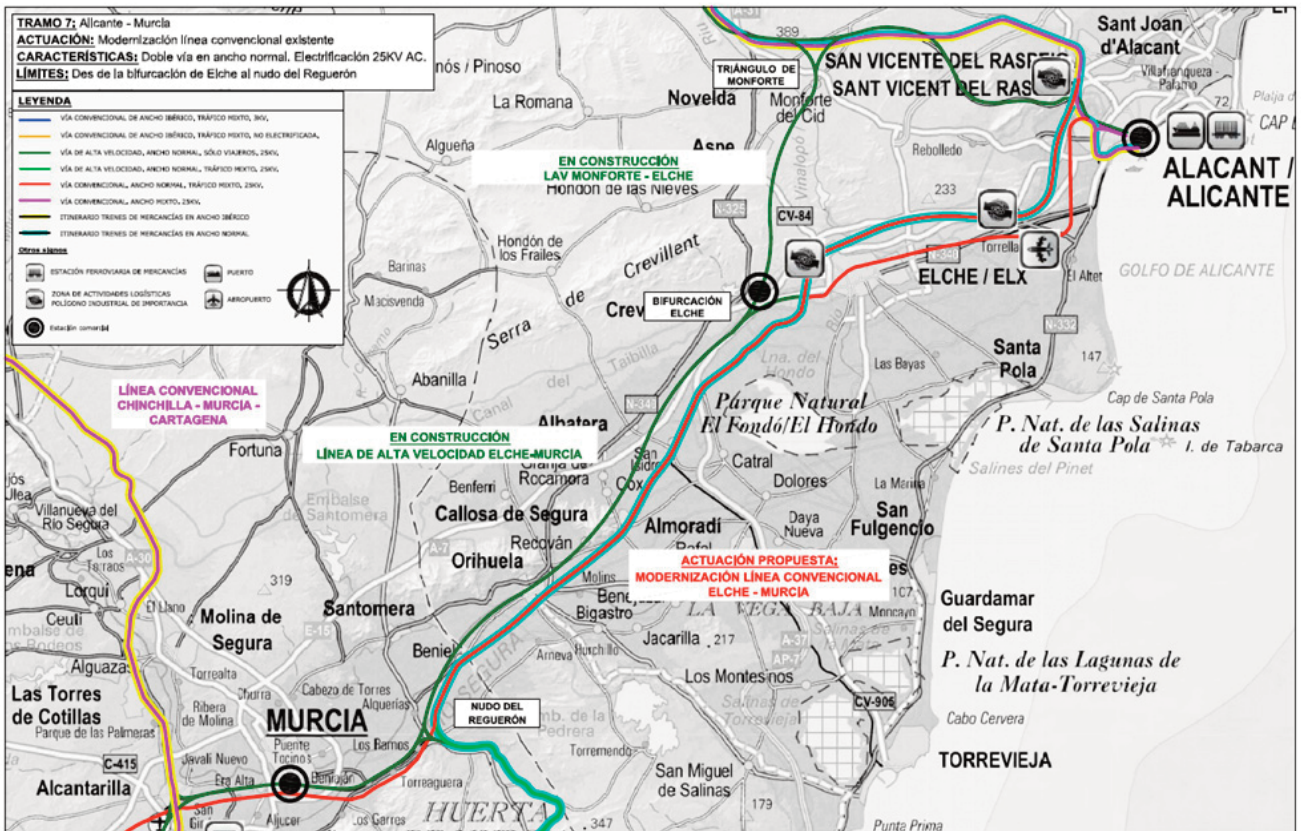


Fig. 4. Solución propuesta para el tramo entre Alicante y Murcia.

La forma final de la nueva red ferroviaria da respuesta a todos los tráficos existentes y futuros:

- Se crea una Línea de Alta Velocidad Mediterránea desde la frontera francesa hasta Sevilla.
- Se crea un eje continuo válido para el transporte de mercancías en ancho internacional, desde la frontera francesa a la portuguesa, conectando con todos los puertos mediterráneos a lo largo de la costa, incluido el puerto fluvial de Sevilla.
- Se garantiza el acceso a todos los puertos del Corredor en ancho ibérico, mediante una utilización racional de la solución de vía de ancho mixto.
- Se respetan las redes actuales de cercanías y regionales, permitiendo en todo caso posteriores ampliaciones sin interferencias con las nuevas infraestructuras planificadas.
- Se modernizan todas las líneas implicadas, reduciéndose en todos los casos los tiempos de viaje y aumentándose la longitud máxima de los trenes de mercancías hasta los 750 metros.

En todos los casos, los corredores propuestos se han estudiado sobre cartografía oficial del IGN a escalas comprendidas entre la 1:50000 y la 1:100.000, según el caso, generándose los planos de trazado en planta correspondientes.

5. Propuesta de modo de implantación y desarrollo.

El último bloque del proyecto está dedicado al desarrollo de las soluciones propuestas. Conocidos de apartados anteriores tanto el estado de la infraestructura como los niveles de demanda, se estudia qué conexiones son prioritarias dentro del propio Corredor. Los resultados del análisis de prioridades ponen de manifiesto grandes necesidades de transporte tanto en la mitad este como en la mitad sur del Corredor. Así, las relaciones Francia-Catalunya-Valencia tanto a nivel de viajeros como de mercancías tienen un peso vital dentro del sector este. A su vez, es fundamental acometer cuanto antes la salida de mercancías desde el puerto de Algeciras por la ruta más directa y eficiente posible hacia Francia. Ello implica que, si se quieren poner en valor las infraestructuras actuales y atender rápidamente los focos de mayor demanda, es necesario acometer un despliegue secuencial de las soluciones propuestas.

La primera fase de despliegue del Corredor del Mediterráneo tiene como objetivo principal restablecer continuidades y poner en valor infraestructuras actualmente infrautilizadas. Las actuaciones propuestas en esta fase son:

- Terminación de la línea de alta velocidad Barcelona-Frontera Francesa, considerando el paso de la LAV por el aeropuerto de Girona y el nuevo By-Pass de mercancías.
- Conexión de la línea de alta velocidad Barcelona-Madrid con la estación actual de viajeros de Tarragona mediante el desarrollo del nuevo Nudo Norte planteado en el proyecto.
- Terminación de la variante de Vandellós y de los ramales necesarios de la bifurcación de Vilaseca y del nudo sur de Tarragona, plantados ambos en el proyecto.
- Conexión de la LAV Barcelona-Frontera a la terminal de La Llagosta y conversión de la misma en Base Intermodal.
- Construcción de los accesos definitivos al puerto de Barcelona.



6. Conclusiones

Una vez determinado el esquema final de la nueva Red Ferroviaria del Mediterráneo y sus características principales, se realiza la evaluación de los objetivos planteados al inicio del proyecto. Se constata que todos los objetivos planteados se han cumplido, tanto para tráfico de viajeros como de mercancías, pudiéndose extraer las siguientes conclusiones vinculadas al desarrollo de las soluciones aportadas y al estudio de los estados actual y planificado de la red ferroviaria española.

La primera conclusión que se extrae del estudio es la importancia de la planificación en el desarrollo de grandes infraestructuras. Resulta evidente que sin una correcta planificación en el corto, el medio y el largo plazo, es imposible desarrollar una red de infraestructuras, ya sea ferroviaria o de cualquier otra índole. El Corredor del Mediterráneo no podrá ser nunca una realidad si no se garantiza su despliegue de forma independiente de los cambios administrativos y gubernamentales que puedan suceder con el tiempo. Para ello, es necesaria una planificación concienzuda, detallada y específica que, a día de hoy, no existe. En algunos casos se ha puesto de manifiesto la existencia de planificaciones no coordinadas, que generan interferencias o simplemente desaprovechan grandes oportunidades de desarrollo local y regional. Es el caso de la entrada de la LAV a Girona, donde se hace patente la falta de planificación de cara a los encaminamientos de mercancías. Existen innumerables ejemplos de falta de coordinación entre la red ferroviaria y la red aeroportuaria, llegando al extremo de que únicamente 2 de los 11 aeropuertos analizados tienen a día de hoy un enlace de alta velocidad planificado o en ejecución. Ninguno de estos aeropuertos es, no obstante, un aeropuerto de tipo principal o internacional.

La segunda conclusión se desarrolla entorno a uno de los objetivos del propio proyecto: el aprovechamiento de las infraestructuras existentes. Uno de los datos más relevantes aportados por este estudio es la elevada capacidad sobrante que existe actualmente en la red convencional. Ello permite plantearse qué hacer con un conjunto de infraestructuras actualmente desaprovechadas por diferentes motivos: falta de conectividad, deficiencias de superestructura, falta de capacidad, etc... Las soluciones dependen del caso particular, pero en general se trata de intentar aprovechar al máximo la red actual y trabajar para integrarla en la nueva red del Corredor, en vez de crear nuevas líneas desconectadas de la red existente. Es necesario plantearse qué actuaciones son necesarias para aumentar el aprovechamiento de la red ibérica y desarrollarlas de forma inmediata. En este sentido se ha planteado la Primera Fase de despliegue del Corredor, con el objetivo de conseguir aumentar la cuota de utilización del ferrocarril sobre las líneas actuales mientras que se desarrollan las siguientes fases de despliegue.



Fig. 6. Evolución de la planificación de infraestructuras ferroviarias en España.

En tercer lugar, destacar entre otras conclusiones la importancia del efecto red. Sin este concepto no tiene sentido el despliegue de ninguna nueva línea de ferrocarril, ya que cualquier nuevo trazado deber formar parte de ese todo general al que llamamos red. De hecho, algunas de las líneas reabiertas o planteadas en este estudio solo tienen sentido precisamente a nivel de conectividad de red. Conexiones esenciales para garantizar el tráfico de trenes de mercancías que, de no existir, les obligarían a dar grandes rodeos por líneas radiales muy alejadas de sus destinos finales.

El efecto red también significa homogeneidad de parámetros. No solamente en los factores evidentes como el ancho de vía y la electrificación, sino también en otros vinculados a la propia infraestructura como son gálibos, rasantes y carga máxima autorizada. Como se ha visto, la falta de cohesión de la red es la que provoca su bajo aprovechamiento, siendo este un hecho que muy pocas veces se tiene en cuenta al plantear nuevas actuaciones sobre la red ferroviaria.

En conclusión, se puede decir que de nuestra capacidad planificadora y de nuestro sentido común dependerá que este Gran Corredor del Mediterráneo sea una realidad en un futuro no muy lejano. Si bien las condiciones económicas no son las mejores, la historia nos enseña que las grandes crisis comportan muchas veces grandes evoluciones. En nuestras manos está el saber aprovechar esta crisis para poder evolucionar hacia un nuevo y próspero futuro.

ANEXOS

TriaRailway R&D es una PYME, que tiene entre sus objetivos continuar siendo empresa puntera en innovación ferroviaria a nivel nacional e internacional en: sistemas de rodadura de ancho variable, tanto en bogies como ejes, de mercancías y pasajeros, sistemas de mercancías multimodales especiales, ingeniería de señalización, explotación y gestión ferroviaria e ingeniería a medida para infraestructura y sistemas ferroviarios.

TriaRailway R&D realiza, como corresponde a una compañía de sus características, la comercialización de sus productos y servicios, así como desarrolla permanentemente su expansión internacional.

Su labor de desarrollo, comercializadora e internacional, la compatibiliza con su participación en proyectos en el marco de consorcios público-privados de concurrencia competitiva. Pero TriaRailway R&D realiza también I+D+i propia, consciente de la importancia que ello le puede suponer en un marco de competitividad y diferenciación en el mercado. Prueba de esta labor, son los dos artículos que se adjuntan “Simulación de Accesibilidad a Vehículos Ferroviarios” y “Proyecto VANELECTRA: Transporte de mercancías ligeras por líneas ferroviarias de altas prestaciones” desarrollados por el equipo de Tria R&D. Con ello, también da cumplimiento a otro de sus objetivos y labores inherentes a esta empresa, como es la difusión de sus resultados y avances tecnológicos.

Simulación de Accesibilidad a Vehículos Ferroviarios

Simulation of Accessibility to Railway Vehicles

Juan Carlos Carrasco Giménez, José Luis Porras Caballero, Diego Pedrosa Espinosa

Departamento de I+D de TRIA Railway R&D
Centro de Tecnologías Ferroviarias ADIF, Málaga

Resumen

Uno de los principales inconvenientes que se plantean en la operación de los sistemas de transporte, especialmente el ferrocarril, es el relativo a la accesibilidad de las personas al modo de transporte. Con el fin de estudiar concretamente la problemática en el sector ferroviario, se ha diseñado un sistema electromecánico que permite simular, en el Laboratorio Estación del Centro de Tecnologías Ferroviarias de ADIF en Málaga, los múltiples escenarios de accesibilidad que se pueden producir en cualquier andén de la Red de Ferrocarriles de Interés General. Dicho sistema se caracteriza por tener una gran versatilidad, permitiendo configurarse para emular cualquier tren del parque móvil de RENFE, material histórico o incluso trenes actualmente en diseño o futuros.

Palabras clave: Accesibilidad, ETI, gálibo, andén, interoperabilidad, PMR.

Abstract

Peoples' accessibility to the mode of transport, is one of the main inconveniences that appears during transport operations, in particular for rail travel. A new electromechanical system has been developed to analyse this problem. The system located at the Station Laboratory, of the ADIF's Railway Technologies Centre, allows multiple accessibility scenarios on any platform to be simulated. This system is characterized by its great versatility, allowing the adoption of the required configuration to simulate any current RENFE's train, historical rolling stock, trains currently under design or even future designs.

keywords: Accessibility, TSI, gauge, platform, interoperability, PRM.

1. Introducción

Las fuertes inversiones que se han llevado a cabo como medida impulsora del transporte ferroviario en los últimos tiempos, en consonancia con las directrices marcadas en el Libro Blanco “La política europea de transportes de cara al 2010”, estaban encaminadas a mejorar la competitividad del sector ferroviario frente a otros modos, atrayendo tráfico de personas y mercancías al ferrocarril. Para conseguir esta atracción no sólo es suficiente con garantizar una adecuada accesibilidad desde el punto de vista de la proximidad al servicio ferroviario, como se está llevando a cabo gracias al Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte, sino también desde el punto de vista del acceso al material rodante.

Según un reciente comunicado de prensa de la Comisión Europea, una de cada seis personas en la UE, es decir, alrededor de ochenta millones, sufre una discapacidad entre leve y grave. Además, un tercio de las personas de más de setenta y cinco años padece algún tipo de discapacidad que restringe sus posibilidades de accesibilidad debido a las barreras físicas encontradas.

La Unión Europea se ha comprometido, tras firmar y ratificar la Convención de las Naciones Unidas sobre los derechos de las Personas con Discapacidad, a crear una Europa sin barreras. En el nuevo Libro Blanco sobre Transportes de 2011, en relación con la calidad y fiabilidad del servicio se considera como objetivo: “mejorar la calidad del transporte para la gente mayor, los pasajeros con movilidad reducida y los discapacitados, mejorando entre otras cosas la accesibilidad de la infraestructura”.

Este compromiso de la Unión Europea, y específicamente con el transporte ferroviario, queda materializado con la Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI) para Personas de Movilidad Reducida (PMR). Según la mencionada ETI, se entiende por Persona de Movilidad Reducida aquella que presenta dificultades para utilizar los trenes o la infraestructura asociada, incluyendo las siguientes categorías:

- Usuarios en sillas de ruedas (personas que emplean la silla de ruedas para desplazarse debido a una dolencia o discapacidad)
- Otras personas cuya movilidad se ve dificultada, en particular:
 - personas con deficiencias en las extremidades;
 - personas con dificultades de desplazamiento;
 - personas con niños;
 - personas con equipaje pesado o voluminoso;
 - personas mayores;
 - mujeres embarazadas;
 - personas con deficiencias visuales;
 - invidentes;
 - personas con deficiencias auditivas;
 - sordos;
 - personas con deficiencias de comunicación (que tienen dificultad para comunicarse o comprender el lenguaje hablado o escrito, incluidos los extranjeros que desconocen la lengua local, las personas con dificultades de comunicación y las personas con deficiencias sensoriales, psicológicas e intelectuales);
 - personas de baja estatura (incluidos los niños).

En este sentido desde el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias como por parte de RENFE se han tomado medidas para corregir estos inconvenientes, encaminados a hacer del transporte ferroviario un modo más accesible para todos.

Con el fin de poder analizar la problemática descrita, y poder simular los diferentes escenarios de accesibilidad al material rodante desde el andén de una estación en cualquier punto de la Red de Ferrocarril de Interés General, se desarrolló para el Laboratorio Estación del Centro de Tecnologías Ferroviarias de ADIF el “SIMAV: Simulador de Accesos a Vehículos Ferroviarios”.

2. Laboratorio Estación del Centro de Tecnologías Ferroviarias de ADIF

El laboratorio fue construido en 2011, y su principal función es la de simular cualquier disposición de andén de la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG) en España. Para ello dispone de un andén de 30 metros de longitud, contando con unas vías dispuestas en ancho ibérico (1.668 mm) y una separación al eje de vía, en horizontal, de 1.680mm, separación más usual de los andenes en España.

El andén está diseñado con la posibilidad de elevarse en altura. Para ello, cuenta con un sistema hidráulico de cuatro pistones conectados a la estructura portante del andén, siendo capaz de elevarlo 300mm, teniendo una cota mínima de 520mm y máxima de 820mm sobre cabeza de carril.



Fig.1. Andén Laboratorio Estación CTF

Con el fin de estudiar el conjunto de la plataforma dentro del andén y evitar así posibles interferencias, se tomaron medidas de las dimensiones en perfil del andén necesarias para poder croquizarlo (figura 2) y modelarlo en 3D (figura 3).

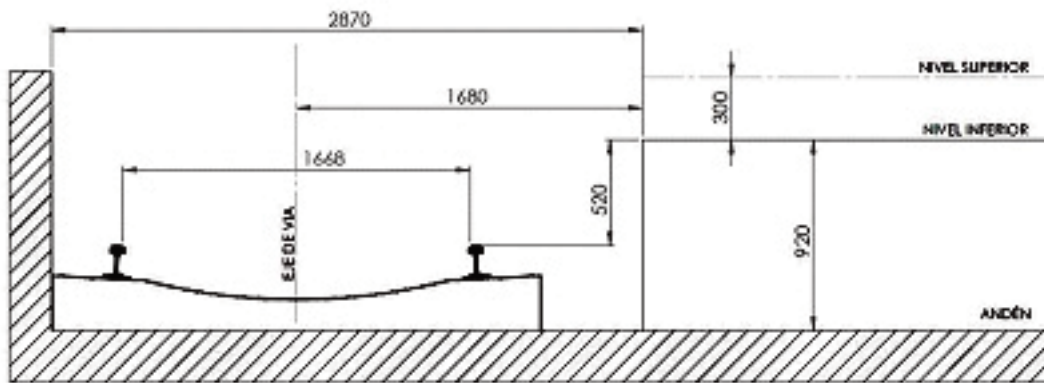


Fig.2. Vista de Perfil Andén del Laboratorio Estación CTF

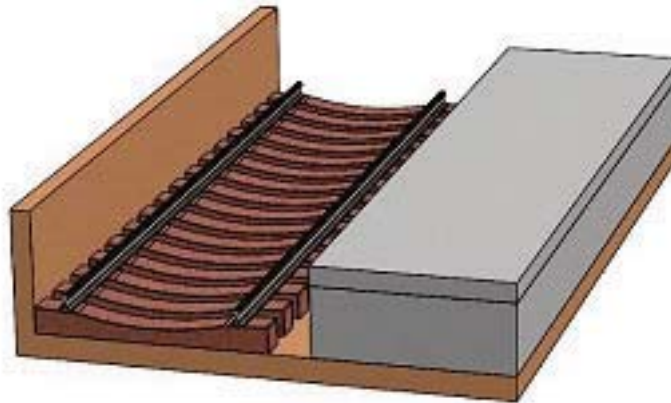


Fig.3. Vista en Perspectiva del Modelo 3D del Andén del laboratorio Estación CTF

3. Proceso de Diseño del Simulador

Tras la modelización tridimensional del andén del Laboratorio Estación, se recopiló información sobre las dimensiones de los diferentes trenes del parque móvil de RENFE actual y series obsoletas o fuera de circulación. El objetivo primordial era poder estimar un rango de valores de funcionamiento del dispositivo.

Como especificaciones de funcionamiento se contaban con las siguientes:

- Plataforma capaz de **simular**, tanto en cota desde cabeza de carril como en separación en borde del andén, el **embarque a diferentes vehículos ferroviarios**.
- Vehículo capaz de simular andenes con vías en **pendiente o peraltadas**.
- Capacidad portante de **500 kg/m²**.
- **Rodadura adaptable** a ancho convencional (1.668 mm) y estándar UIC (1.435 mm).
- Sistema de **freno manual** incorporado para estacionamiento.

- Plataforma equipada con **barreras de mano** de protección lateral.
- Sistema de regulación vertical y horizontal compuesto por **husillos eléctricos regulados por autómata**.
- **Mando de control** para la regulación de la plataforma.
- Capacidad de ser **fácilmente desmontable** en módulos para su transporte.

En primer lugar, se realizó una búsqueda de precedentes o maquinaria de similares características que pudieran servir de inspiración para la fase de diseño conceptual. Se constató la ausencia de dispositivos con las especificaciones técnicas requeridas. Así pues, se tomó como referencia maquinaria ligera de manipulación de vía como la de la figura 2, obteniendo ideas como por ejemplo, el sistema de rodadura de estos dispositivos, una estructura portante con perfiles tubulares o sujeción de elementos adicionales entre otros.



Fig. 4 Maquina centradora de vías

En la figura 5 se representa el primer boceto conceptual realizado donde se esquematiza una idea inicial del conjunto y los movimientos a realizar por el simulador, diferenciando entre tres plataformas. La inferior será la bancada que soporta todo el dispositivo y permite la rodadura sobre los raíles, una intermedia que permite el desplazamiento horizontal sobre la inferior para su acercamiento al andén y por último una plataforma superior la cual se eleve para el posicionado en altura de los distintos trenes.

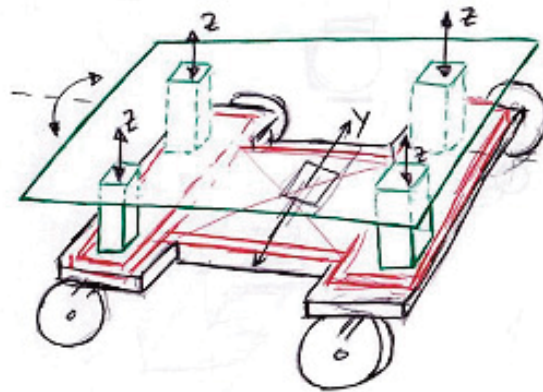


Fig. 5 Primer Boceto Conceptual del SIMAV

A partir de este y otros bocetos realizados a mano alzada, y teniendo en cuenta las dimensiones especificadas, se comienzan a diseñar las primeras partes del simulador, sin entrar en detalle, intentando adquirir una visión de conjunto de cómo podría componerse el sistema.

A continuación se muestra la evolución de los distintos diseños realizados del simulador a lo largo del proceso, junto con una descripción de los sistemas alternativos que se han ido proponiendo hasta encontrar la solución definitiva que actualmente se encuentra en el Centro de Tecnologías Ferroviarias de ADIF.

SIMAV: Primer Diseño

Se modelaron las distintas plataformas como sólidos, y se comienzan a idear los mecanismos de elevación y desplazamiento horizontal. Para estos movimientos se eligen unos husillos mecánicos reversibles accionados por motores eléctricos independientes. La plataforma superior dispone de unos cajones para permitir bajar la cota del piso sin interferir con los elementos mecánicos. La plataforma intermedia se desplaza horizontalmente sobre la inferior por medio de unas guías.

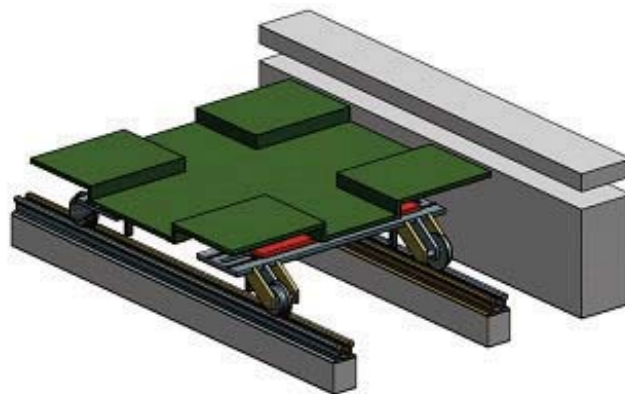


Fig. 6 Perspectiva primer diseño

En este punto se comenzaron a simular las distintas posibilidades de movimientos del dispositivo, con el fin de encontrar interferencias y solucionarlas con sistemas y elementos alternativos.

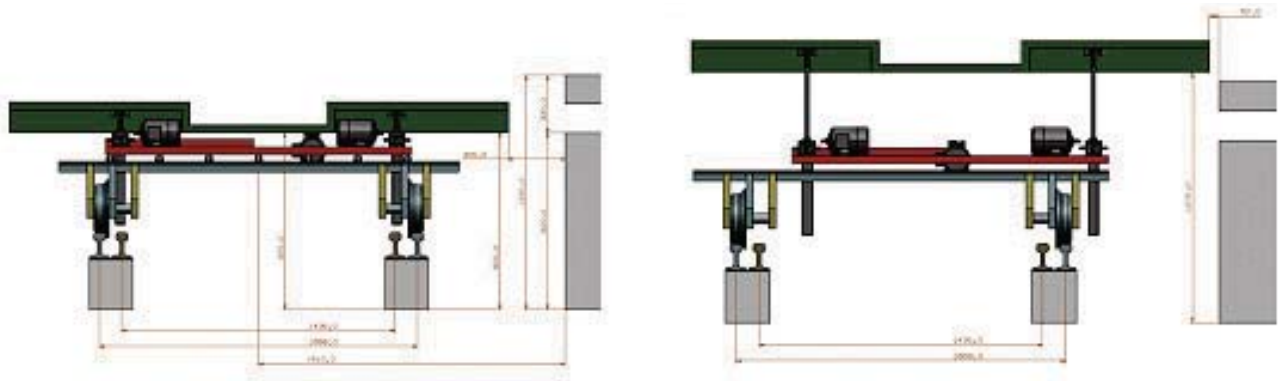


Fig.7 Posición con altura mínima de piso (izquierda) y máxima (derecha) en primer diseño

SIMAV: Segundo Diseño

En el siguiente avance, el aspecto a destacar es el diseño de las distintas plataformas mediante perfiles tubulares, con lo que se reduce considerablemente el peso y se dota de la solidez necesaria al simulador. Para dar consistencia al piso transitable de la plataforma superior se utilizan unos elementos emparrillados de tramex, los cuales a parte de aligerar la estructura, ofrecen una superficie antideslizante.



Fig. 8 Perspectiva segundo diseño

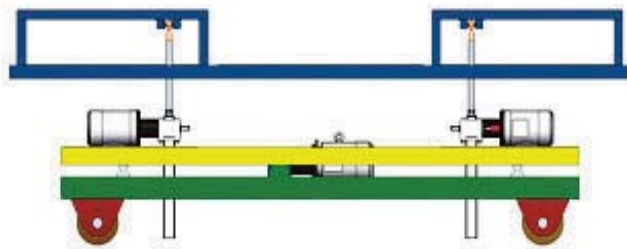


Fig.9 Vista perfil segundo diseño

Como inconveniente se planteó la dificultad de elevar la plataforma superior por medio de unos husillos mecánicos sin guiar dicho movimiento. En posiciones elevadas estos husillos tenderían a flectar en cuanto la componente de la carga no fuese totalmente vertical, ya que no están diseñados para soportar cargas laterales. Además la plataforma debe permitir, como se indica en las especificaciones, una inclinación para simular el peralte en curva, condición que agravaría el problema.

SIMAV: Tercer Diseño

Para solventar el problema anterior de la necesidad de guiar el movimiento vertical, se pensó una solución alternativa que incorporara unos sistemas de elevación por medio de mecanismos de tijera. Estos se diseñaron incorporando unos husillos mecánicos en posición horizontal que actúan sobre la base del sistema para proporcionar el desplazamiento vertical. Para poder cumplir las especificaciones referentes a la inclinación de la plataforma, se hace necesaria la instalación de cuatro mecanismos independientes.



Fig.10 Perspectiva del diseño del mecanismo de tijeras

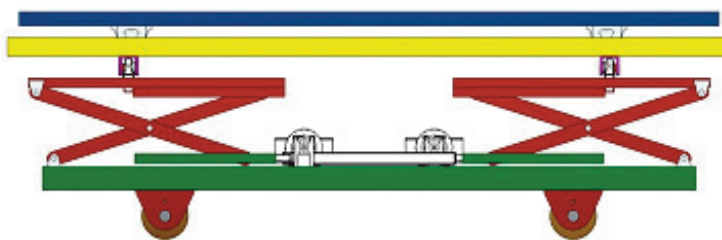


Fig.11 Vista de perfil del diseño del mecanismo de tijeras

Al analizar con mayor profundidad la alternativa propuesta comenzaron a surgir los siguientes inconvenientes:

- En primer lugar, el simulador no permite alcanzar la cota vertical más baja en referencia a la distancia entre la cabeza del carril y el piso transitable de menor cota, debido al espacio ocupado por el mecanismo de tijera.

- En segundo lugar, se comprueba que en los sistemas de elevación por mecanismos de tijeras se emplean sistemas hidráulicos, ya que la fuerza necesaria para realizar la elevación de la carga cuando el mecanismo se encuentra en su posición más baja se ve incrementada debido al efecto multiplicador inherente al mecanismo. Además estos sistemas son más complejos y para el caso en estudio, donde se va a ubicar el simulador a la intemperie, los aspectos relativos al mantenimiento cobran una especial relevancia.

SIMAV: Cuarto Diseño

Tras haber descartado el mecanismo de tijera, se continuó el proceso de búsqueda de una solución más viable al problema de elevación de la plataforma. En este punto del diseño, y tras haber valorado distintas opciones, se plantea la posibilidad de instalar unas columnas elevadoras, obteniendo la idea de los sistemas de elevación de coches en los talleres de mecánica.



Fig.12 Sistemas de columnas elevadoras comerciales

La mayoría de estos sistemas utilizan unos husillos mecánicos en posición vertical, realizando la elevación de la carga de manera guiada por medio de unos perfiles guía, los cuales otorgan la rigidez a flexión necesaria.

Para incorporar este sistema en el diseño, se optó por cambiar la configuración de las plataformas que conforman el SIMAV. Tal como se aprecia en la figura 13, las columnas de elevación pasaron a apoyarse sobre la bancada inferior. La plataforma intermedia quedaría conectada a las columnas de elevación mediante un carrito de elevación que abraza al husillo. Para poder producir el movimiento horizontal, se conecta la plataforma superior a la intermedia mediante guías lineales.

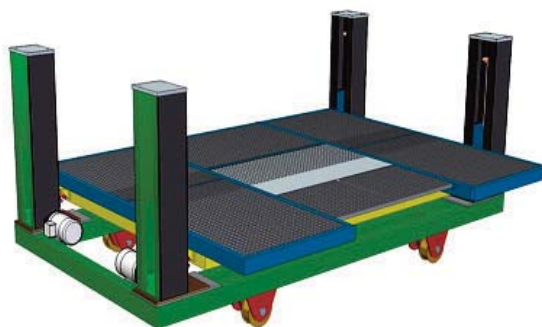


Fig.13 Perspectiva diseño columnas elevadoras

SIMAV: Diseño Definitivo

Como últimos avances más representativos, incorporados en el diseño del simulador, se presentan las siguientes mejoras:

- En cuanto a las columnas elevadoras, se invierte la posición del husillo, instalándolo en la parte superior de estas, ya que en el diseño anterior, al estar en la parte inferior, existía una limitación para poder bajar la plataforma hasta la cota mínima requerida.
- En cuanto al desplazamiento horizontal, desde un principio se utilizó un sistema de guías lineales de recirculación de bolas como el mostrado en la figura 14, que presentan como principal ventaja la precisión en los movimientos, cuestión que quedó desestimada principalmente por su elevado coste.



Fig.14 Sistema de guías lineales de recirculación de bolas

Analizando el mecanismo y su función en detalle, se llegó a la conclusión de que no era esencial una precisión elevada para la aplicación objeto de estudio.

En su lugar se sustituyeron por ruedas de nylon mecanizadas que discurren por el interior de un perfil en U. La prestación de resistencia a carga elevada queda garantizada con este sistema y la precisión conseguida está dentro del rango exigido en las especificaciones técnicas del equipo.



Fig.15 Sistema de guiado en grúas portavehículos

Tras analizar todos los mecanismos y soluciones adoptadas durante el proceso de diseño se llegó a la conclusión de que la configuración óptima es la mostrada en la figura 16.

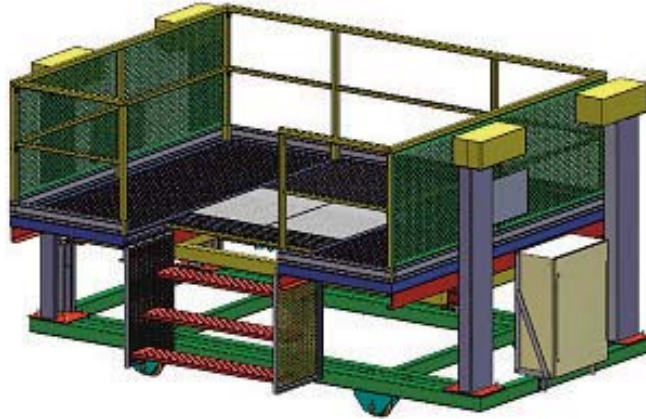


Fig.16 Perspectiva diseño definitivo del simulador

SIMAV cuenta con tres plataformas:

La plataforma inferior tiene como finalidad realizar las funciones de bancada o soporte de toda la estructura. Contiene el sistema de rodadura, que permite ser adaptado a ancho ibérico y estándar UIC, además de soportar las columnas de elevación, tal y como se muestra en la figura 17. Los motores se ubican en la superficie superior protegidos mediante cubiertas extraíbles.

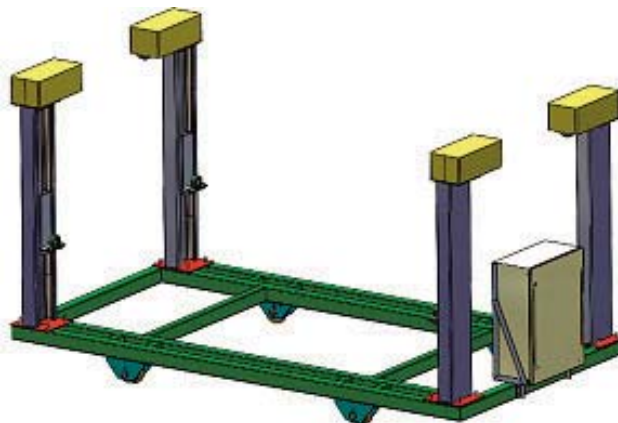


Fig.17 Conjunto Bancada Inferior

La bancada intermedia contiene el sistema de rodillos que permite el desplazamiento de la plataforma horizontal, así como la fijación del husillo horizontal y el motor.

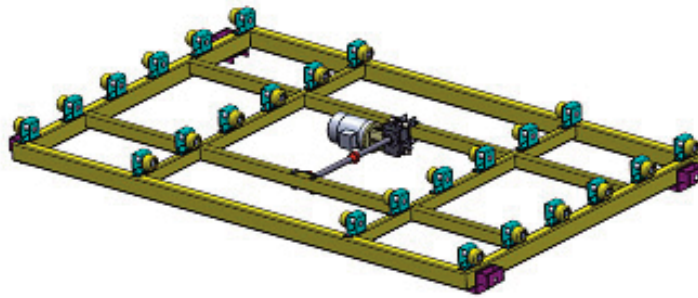


Fig.18 Conjunto Bancada Intermedia

La bancada superior contiene en su parte inferior la pieza de soporte de la tuerca del husillo horizontal, encargado de este desplazamiento al girar las ruedas de nylon en el interior de los perfiles en U soldados a la parte inferior de la estructura de la plataforma superior.

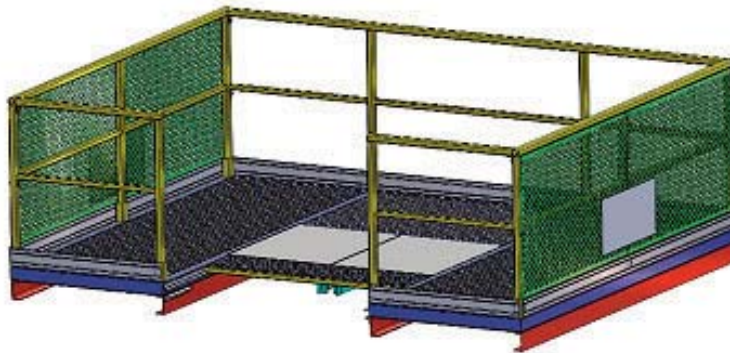


Fig.18 Conjunto Bancada Intermedia

La estructura se complementa con un sistema de escaleras desmontable y fácilmente adaptable a la diferente disposición que se puede encontrar de escalones y estribos en los trenes que se pretenden simular. Según la disposición que se adopte, se atornillan los peldaños a la chapa perforada teniendo en cuenta ciertas tolerancias en las cotas verticales y horizontales.

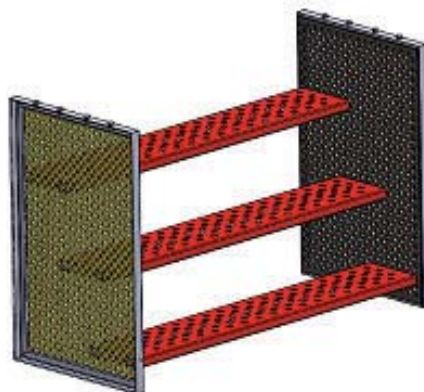


Fig.19 Sistema de Escalones

Uno de los aspectos clave es la capacidad de simular peralte y pendiente con los requisitos de esfuerzos que conlleva para los puntos de unión a las columnas de elevación. Para ello se empleó una combinación de casquillos alojados en cojinetes con rótulas. Para lograr la funcionalidad representada en la figura 21, se practicaron agujeros colisos en los soportes correspondientes para que los ejes pudiesen deslizarse y así conseguir la inclinación deseada en la plataforma.

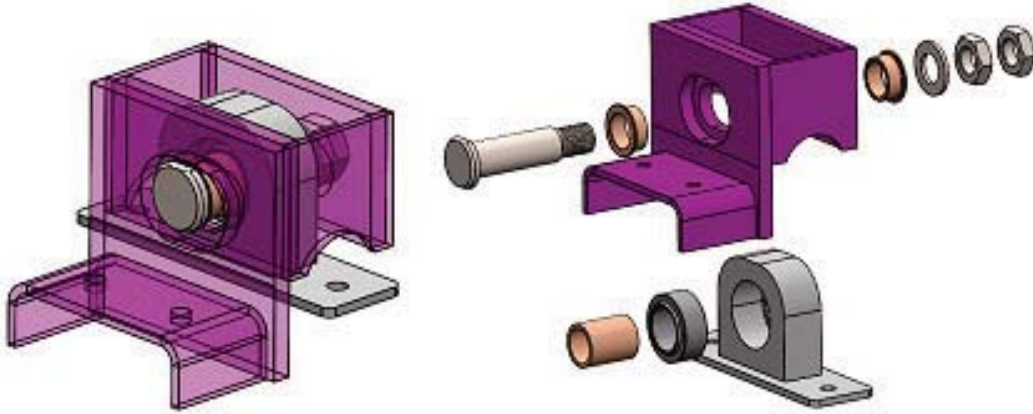


Fig.20 Vista explosionada articulación 4

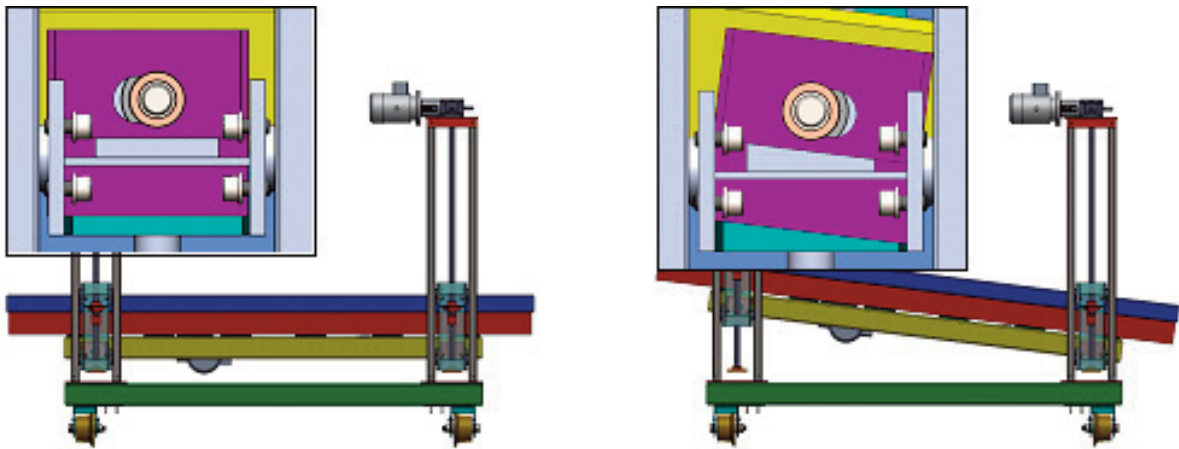


Fig.21 Vista en detalle en posición de peralte máximo

El control del SIMAV se logra mediante un mando con pantalla táctil. Permite simular posiciones introduciendo las medidas manualmente o en modo automático, guardando un listado de trenes en memoria. La figura 22 muestra el SIMAV simulando la posición del tren S-104 de RENFE.



Fig.22 Simulación del tren S-104 de RENFE.



Fig.23 Vista Frontal SIMAV (izquierda) y vista lateral durante la visita de la Ministra de Fomento al CTF (derecha).

4. Conclusión

Se ha diseñado un sistema para simular la accesibilidad a cualquier vehículo ferroviario en el Laboratorio Estación del Centro de Tecnologías Ferroviarias de Málaga.

El sistema funciona mediante la actuación por husillos eléctricos reversibles accionados mediante motorización independiente y controlados por un autómata programable a través de una pantalla táctil portátil.

El sistema permite simular situaciones de acceso con pendiente y peralte, para ello cuenta con conexiones a las columnas de elevación basadas en cojinetes, rótulas, casquillos y colisos.

El equipo es capaz de circular tanto en ancho estándar UIC como ibérico.

Referencias

- [1] COMISIÓN EUROPEA. Libro Blanco “La política europea de transportes de cara al 2010”, 2001.
- [2] EUROPEAN RAILWAY AGENCY. Especificación Técnica de Interoperabilidad de Personas con Movilidad Reducida, 2008.
- [3] COMISIÓN EUROPEA, Libro Blanco de Transportes 2011.
- [4] MINISTERIO DE FOMENTO. Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte, 2005.
- [5] NORMA UNE-EN 280:2002. Plataformas elevadoras móviles de personal.
- [6] NORMA UNE-EN 58921:2002. Instrucciones para la instalación, manejo, mantenimiento, revisiones e inspecciones de las plataformas elevadoras móviles de personal.
- [7] NORMATIVA DE RENFE VÍAS. N.R.V. 0-2-0.0, de Parámetros Geométricos
- [8] NOTA TÉCNICA DE PREVENCIÓN nº 634: Plataformas elevadoras móviles de personal. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT).
- [9] NOTA TÉCNICA DE PREVENCIÓN nº 123: Barandillas. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT).
- [10] LADRÓN DE GUEVARA, I.: El dibujo técnico y sus normas (Apuntes asignatura Expresión Gráfica). Universidad de Málaga.
- [11] NORTON, R. L. (1999): Diseño de máquinas. Ed. Prentice Hall. México.
- [12] SHIGLEY, J. E. y MISCHKE, C. R. (1988): Teoría de máquinas y mecanismos. Ed. McGraw-Hill. México.
- [13] SHIGLEY, J. E. y MISCHKE, C. R. (1990): Diseño en ingeniería mecánica. Ed. McGraw-Hill. México.
- [14] SIMÓN, A.; BATALLER, A.; GUERRA, A.; ORTIZ, A. y CABRERA, J. (2005): Fundamentos de teoría de máquinas. Ed. Bellisco.
- [15] TIMOSHENKO, S. (1957): Resistencia de materiales. Espasa-Calpe, S.A. Madrid, 2 tomos.

Proyecto VANELECTRA: Transporte de mercancías ligeras por líneas ferroviarias de altas prestaciones

VANELECTRA Project: Intermodal transportation system for light freights and road vehicles across high velocity railway lines

Pablo Gadea Garzón

ICCP. TRIA Railway R&D

Resumen

El Proyecto VANELECTRA pretende desarrollar un sistema de transporte intermodal, diseñado para facilitar el traslado de mercancías y vehículos ligeros de carretera a través de líneas ferroviarias de altas prestaciones. La combinación entre la versatilidad del vehículo eléctrico de carretera con la eficiencia energética del ferrocarril en el traslado de grandes cargas a largas distancias consigue un conjunto eficaz en los ámbitos técnico, ecológico y social.

Palabras clave: Vehículo eléctrico, consumo energético, mercancías ligeras, alta velocidad.

Abstract

VANELECTRA Project aims to develop an intermodal transportation system, designed to facilitate the movement of goods and light road vehicles through high-performance railway lines. The combination of versatility road electric vehicle, and railway efficiency to move large loads over long distances with a powerful set in the technical, ecological and social.

keywords: Electric vehicle, power consumption, light freights, high velocity lines.

1. Introducción

TRIA Railway R&D persigue el objetivo de consolidarse como una empresa puntera en innovación ferroviaria a nivel nacional e internacional, trabajando para ello en diversos proyectos de investigación, desarrollo e innovación en el ámbito del transporte terrestre.

Entre los proyectos actualmente en desarrollo, el **Proyecto VANELECTRA** permitirá minimizar el impacto producido por el conjunto de medios de transporte sobre el medio ambiente, mejorando la seguridad rodada debido a la disminución del tráfico, aumentando la eficiencia energética global del sistema, y potenciando el desarrollo de vehículos eléctricos que puedan ser cargados en un tren especialmente diseñado para ello.

2. Antecedentes

2.1. Antecedentes ferroviarios tradicionales

El **Proyecto VANELECTRA** aúna la experiencia conseguida durante años en diversos ámbitos del sistema ferroviario: tren completo, vagón disperso, transporte de paquetería y mercancías ligeras, intermodalidad; y la combina con las necesidades del siglo XXI: eficiencia energética, velocidad, disminución del uso de combustibles fósiles y optimización de recursos.

Se denomina “Tren completo” al tren de mercancías con un único origen y destino, que sirve generalmente a sectores aislados muy dependientes del ferrocarril para sus traslados: automóviles, siderurgia, graneles sólidos de bajo valor añadido, y productos químicos altamente peligrosos. La elección del ferrocarril como modo de transporte viene determinada por el elevado volumen de tráfico de dichos transportes, utilizando trenes que completan la carga remolcada admisible en la mayoría de los casos, y con una frecuencia de circulación fija. La ausencia de maniobras entre origen y destino (salvo las estrictamente necesarias por motivos técnicos), permite una regularidad en la circulación y unos costes económicos asumibles que justifican el uso del ferrocarril para dichos servicios.



Figura 1: Furgones para el transporte de paquetería en trenes rápidos de viajeros, algunos de ellos preparados para circular a 160 km/h, esperando su desgüace en la estación de Soria-Cañuelo. Año 2003.

El “Vagón Disperso” era una actividad ferroviaria que consistía en el traslado de mercancías de pequeño volumen de tráfico. Requería numerosas instalaciones fijas, que estaban situadas en todas las dependencias ferroviarias que llegaban a la categoría de estación: vías de apartado, almacén de mercancías y muelles cubierto y descubierto. La deserción de las compañías para este tipo de tráfico ha provocado el abandono de dichas instalaciones, así como la de ramales industriales y derivaciones particulares a empresas y factorías. También se ha desmantelado gran parte del parque móvil de vagones que poseían la antigua Renfe y algunos propietarios privados, que ya no pueden encaminar sus mercancías en tráficos de volumen inferior al tren completo.

Las principales causas para el fin del servicio del vagón disperso fueron sus altos costes fijos y de explotación, y su falta de competitividad con la carretera: los trenes efectuaban multitud de maniobras durante su recorrido, aumentando el tiempo de viaje hasta el punto de impedir la competitividad del servicio y la rentabilidad económica.

El tráfico de Paquetería, o de Detalle, engloba todas las cargas inferiores a los 3.500 kg. que no puedan completar un vagón. Tras la desaparición del TIDE (tráfico de detalle ordinario), el último intento por parte de Renfe para su potenciación fue conocido como Paquexpres (tráfico de detalle acelerado), a principios de la década de los 90. La mayor parte de las administraciones europeas han renunciado a ofertar este servicio, aunque existen excepciones, como Suiza, y experiencias, como la de SNCF con el TGV Postal, que puede ser considerada como la más destacada en materia de transporte de mercancías en líneas de alta velocidad. El TGV Postal alcanza una velocidad máxima de 270 Km/h, con una longitud de 200 metros y un peso de 345 toneladas (1 coche motor + 8 remolques + 1 coche motor, aprox. 17,5 ton/eje).

Por último, la industria automovilística ha sido tradicionalmente una de las mayores usuarias del transporte de mercancías por ferrocarril, teniendo siempre en cuenta para la localización de sus factorías la proximidad de una línea férrea. El transporte de vehículos también se realizó durante muchos años a nivel particular con el servicio denominado “Autoexpreso”, que Renfe ofertaba en una gran parte de sus servicios nocturnos radiales y en la práctica totalidad de los transversales, y que permitía a los viajeros transportar su coche en el mismo tren en que realizan su viaje a precios muy competitivos.

2.2. Antecedentes intermodales de transporte de vehículos completos

El transporte ferroviario intermodal puede clasificarse en transporte de contenedores, cajas móviles y semirremolques; y en transporte de vehículos completos (carretera rodante). Dentro de este último apartado, destacan experiencias como *Le Shuttle*, que permite el traslado de vehículos de carretera entre Francia y Reino Unido a través del Eurotunnel.

El *Modalohr* consiste en un vagón doble de plataforma muy rebajada, apoyado sobre bogies, donde la propia cabeza tractora del camión carga su semiremolque en el tren evitando la utilización de elementos auxiliares. Las terminales de carga y descarga cuentan con motores a pie de vía que hacen girar a las plataformas para permitir la descarga del conjunto de camiones de forma simultánea y perpendicular al eje del tren.

El sistema *RoLa* se basa en un vagón plataforma rebajado en toda su longitud que forma una carretera por la que avanzan los vehículos carreteros durante su carga o descarga. Permite el transporte de camiones completos sin tener que realizar ningún tipo de modificación en los mismos.

3. Descripción del sistema

El **Proyecto VANELECTRA** consta de dos elementos básicos totalmente independientes: por una parte, los vehículos eléctricos de transporte por carretera que recojan la mercancía en el punto solicitado por el cliente, y por otra, el convoy ferroviario que los transporta entre las terminales locales de carga y descarga.

El tren está preparado para suministrar, a partir del sistema de electrificación de la línea férrea, energía eléctrica a todas las furgonetas que haya cargado, aprovechando el tiempo de desplazamiento entre ciudades para recuperar el nivel de las baterías, y poder comenzar la distribución final de la mercancía de forma inmediata tras la llegada del tren a destino.

3.1. Vehículos eléctricos

Aunque sus prestaciones todavía quedan lejos de las ofrecidas por los vehículos impulsados por combustibles fósiles, los vehículos eléctricos se están convirtiendo en una alternativa viable para circuitos urbanos o periurbanos a nivel doméstico o comercial.

Frente a un diseño de vehículo propio, el **Proyecto VANELECTRA** ha considerado la opción de utilizar soluciones existentes, principalmente debido a la intención de facilitar el mantenimiento y la obtención de repuestos. La autonomía que ofrecen los actuales vehículos comerciales (alrededor de 150 km.) se considera suficiente para el acarreo de mercancías desde las terminales, y su gálibo cumple con los requisitos del transporte por ferrocarril.

Las características definitorias de los vehículos eléctricos son las siguiente:

- Autonomía y tiempo necesario para la recarga
- Dimensiones y peso optimizados para el tren
- Maniobrabilidad
- Costes y amortización

3.2. Tren

Los trenes del **Proyecto VANELECTRA** estarán formados por locomotoras eléctricas capaces de remolcar la composición y alimentar tanto los servicios auxiliares como las baterías de los vehículos. Dispondrán de un coche de viajeros que permita viajar con comodidad a los conductores de los vehículos eléctricos, y de la composición en la que se trasladarán las furgonetas.

La locomotora y el coche de viajeros no requieren ningún tipo de tratamiento especial, pudiendo utilizarse material actualmente excedente del parque de Renfe, como las locomotoras de la serie 252 y los coches de viajeros de la serie 2.000.

Locomotora serie 252



Figura 2: La 252-066 remolca la composición de Talgo IV “Finisterre” (Barcelona-Sants – A Coruña/Vigo en días alternos) y “Covagonda” (Barcelona-Sants – Gijón), fotografiada en Miranda de Ebro (Burgos).

Originalmente, las locomotoras de la serie 252 se montaron sobre bogies de ancho UIC (unidades 1 a 15) y bogies de ancho Ibérico (unidades 16 a 75), siendo las primeras bitensión (25 kV AC / 3 kV CC) y las segundas monotensión (3 kV CC). La evolución de la red de alta velocidad exigió progresivamente la adaptación de un número mayor de locomotoras a las características AV, hasta que el auge de las composiciones de automotores indeformables hizo disminuir su uso diario.

La última adaptación realizada se ha llevado a cabo para dar servicio a la nueva línea Figueres-Perpignan, preparándose cuatro locomotoras para funcionar bajo la tensión de electrificación de la red francesa (1,5 kV CC).

Los trenes propuestos en este estudio poseen características similares (hasta 400 m. y de alrededor de 400 t.), a los que las locomotoras 252 han remolcado desde 1992 en las líneas de Alta Velocidad.

Principales características de las locomotoras de la serie 252:

o Tipo: Locomotora de línea	o Ancho de vía (mm): 1435 / 1668
o Fabricantes: Siemens, CAF, GEC-Alsthom y Krauss-Maffei	o Electrificación: 25 kV 50 Hz AC / 3 kV CC / 1,5 kV CC
o Año de fabricación: 1991-1996	o Velocidad comercial máxima (km/h): 220
o Número de unidades: 75	o Potencia (kW): 5600
o Ejes según UIC: Bo'Bo'	o Motores: 4 trifásico-asíncronos TB 2824-OGA02 de 1.438 kW
o Longitud / Anchura / Altura (m): 20,38 / 3 / 4,31	o Sistemas de seguridad: ASFA, LZB, ERTMS
o Peso (t): 90 (bicorriente) / 86 (monocorriente)	o Mando múltiple: 2 unidades
o Peso por eje (t): 22,5 (bicorriente) / 21,5 (monoc.)	

Coche de viajeros serie 2000



Figura 3: Un coche de clase Turista de la serie 2.000, en cola del Arco Irún/Bilbao-Abando – A Coruña/Vigo, en las cercanías de Quintanilleja (Burgos).

Los coches de la serie 2.000 provienen de una profunda transformación realizada a los coches B11x-10200 (antigua serie 10.000 de segunda clase), en el TCR de Málaga-Los Prados, para prestar servicios de gama media en el Corredor Mediterráneo. Actualmente circulan también en las relaciones País Vasco-Galicia, y en el refuerzo de servicios en puntas de tráfico.

Principales características de los coches de viajeros de la serie 2.000:

o Tipo de tren: Coche de pasajeros	o Ancho de vía: equipado con bogies de 1.668 mm.
o Fabricante original: MACOSA, CAF y Babcock Wilcox	o Velocidad comercial máxima (km/h): 200
o Reforma: Renfe-Integria (Los Prados, 1999)	o Número de plazas:
o Unidades fabricadas: 41 coches	A9t-2000: 56 plazas en clase Preferente
o Ejes según UIC: 2 bogies CAF-GC3 por coche	B10t-2200: 80 plazas en clase Turista
o Longitud / Anchura / Altura (m): 26,4 / 2,867 / 4,05	Br3t-2800: 24 plazas en clase Turista + 1 plaza
o Peso (t): 43 a 44,2	o PMR (la mitad del coche está destinado a cafetería)
	o Características del convertidor para servicios auxiliares: 3 kV / 40 kW

Vagón gusano

Los vagones de carga de furgonetas forman dos composiciones indeformables de 200 y 150 m. de longitud, cuyo interior será diáfano y continuo para posibilitar la circulación de furgonetas desde un extremo hasta el otro. La composición base de locomotora, coche de viajeros y vagones gusano supone una longitud máxima de 400 m., acorde con la explotación típica de una línea de Alta Velocidad. En el caso de circulación nocturna la longitud máxima del tren puede ser mayor.

La longitud de cada vagón viene dada por la distancia entre ejes necesaria para transportar la carga. Dicha distancia es función del peso máximo por eje admitido por la red, y del gálibo estático.



Figura 4: Vagón gusano cargado con tres furgonetas posicionadas para recargar sus baterías durante el viaje.

El aprovechamiento de las capacidades máximas de transporte del tren depende de la distribución del volumen de carga dentro de la furgoneta, cuyo mayor tamaño actualmente comercializado oscila entre 7.345 x 3.055 x 2.426 (largo, ancho, alto; mm.), y 7.142 x 3.250 x 2.654.

El espacio destinado a la carga en cada una de ellas es de unos 18 m². La optimización de la carga transportada por el tren se conseguiría rediseñando dichos habitáculos, con el objetivo de reducir con ello la longitud de la furgoneta, manteniendo siempre unos parámetros de uso cómodos para el cliente.

Los gálipos que deben cumplir los vagones gusano son los indicados en la Declaración de Red de ADIF. Para las redes de ancho Ibérico y ancho UIC son los siguientes:

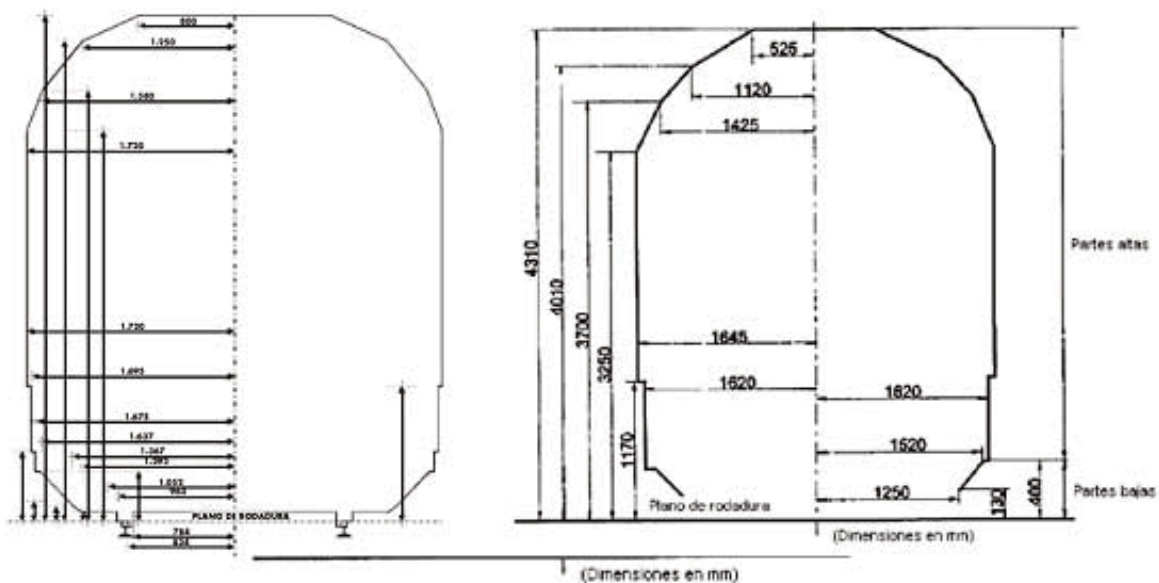


Figura 5: Gálipos simplificados para ancho Ibérico y ancho UIC.

A partir de los datos: peso y longitud de furgoneta, tara y longitud del vagón y peso propio del eje/bogie, puede calcularse la resultante del peso por eje de un vagón de la longitud dada. En segundo lugar, considerando como dato el peso máximo por eje, buscamos la longitud máxima que pueden tener los vagones.

Tipo de vagón		Articulado de bogies	Articulado de ejes	Articulado de bogies	Articulado de ejes	Articulado de bogies	Articulado de ejes
Tipo de furgoneta		Estándar de 5,90 m.		Optimizada de 4,50 m.		Comercial de 7,30 m.	
Peso furgoneta	(kg)	3500	3500	3500	3500	3500	3500
Longitud furgoneta	(m)	5,90	5,90	4,50	4,50	7,30	7,30
Carga por metro	(kg/m)	593,22	593,22	777,78	777,78	479,45	479,45
Tara vagón sin bogies	(kg)	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Longitud por vagón	(m)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Tara vagón sin bogies / metro	(kg/m)	400	400	400	400	400	400
Peso propio eje/bogie	(kg)	2500	1800	2500	1800	2500	1800
Nº ejes/bogie	(ud)	2	1	2	1	2	1
Peso propio eje/bogie	(kg)	5000	1800	5000	1800	5000	1800
Resultante peso por eje vagón de longitud dada	(kg/eje)	14915,25	26630,51	17222,22	31244,44	13493,15	23786,30
Peso máximo por eje	(kg/eje)	22500	22500	22500	22500	22500	22500
Longitud tomando Resultante = Peso máximo admitido	(m)	35,24	20,84	29,72	17,58	39,80	23,54

Se puede apreciar como, con furgonetas estándar y utilizando sistemas articulados de bogies, un vagón tipo de 25 m. no llega a 15 t/eje de carga máxima. Utilizando la capacidad máxima de las líneas (22,5 t/eje), los vagones podrían llegar a una longitud teórica mayor de 35 m. Optimizando la longitud de la furgoneta a 4,5 m. nos acercamos a un valor aceptable de carga de 17,2 toneladas.

Teniendo en cuenta las restricciones de gálibo debidas a los radios mínimos en terminales y al aumento de equipos en los vagones, la solución de rodadura adoptada se basa en:

- Ejes compartidos entre cajas
- Distancia entre ejes de 12 m.
- Cajas limitadas por el gálibo estático

Los vagones se equipan con una rampa que facilita la carga de los vehículos, siendo su altura compatible con los andenes.

4. Explotación

No existen restricciones especiales para la circulación de un tren dedicado al transporte de mercancías y vehículos ligeros por líneas de altas prestaciones. Puede ser grafiado en horario nocturno o diurno, con una velocidad máxima de 200km/h y con longitudes mínimas de 400 metros.

- Horarios nocturnos: Transporte Urgente de Paquetería

La explotación de los trenes se realizará durante la noche, compatibilizándola con las bandas de mantenimiento de las líneas.

- Horarios diurnos: Transporte de Paquetería y mercancías de reparto logístico

Los horarios diurnos pueden ser aprovechados para transporte de mercancías a zonas logísticas no urgentes. Esta posibilidad requiere amoldarse a los horarios de los servicios de transporte de viajeros.

Actualmente existe una demanda real y actual para el servicio de nuestro proyecto, servida con furgonetas de motores de combustión. Numerosas empresas de transporte de paquetería organizan su logística a través de decenas de vehículos que parten al finalizar la tarde desde diversos puntos de España, en dirección a instalaciones logísticas situadas en las cercanías de Madrid. Tras la reclasificación de la mercancía, cada una de ellas vuelve a su lugar de origen cargada con los nuevos artículos.

El **Proyecto VANELECTRA** pretende comenzar con la relación nocturna Madrid-Barcelona y estudiar todos los casos donde el número de furgonetas justifique el uso del convoy ferroviario, y las infraestructuras permitan tiempos de viaje competitivos con la carretera.

4.1. Simulación de consumos

A continuación se muestran dos simulaciones realizadas para composiciones formadas por locomotora 252, coche de viajeros 2.000 y uno o dos gusanos.

Composición del tren:		Locomotora 252		90 toneladas						
		Coche 2000		44 toneladas						
		2 Gusanos		2x213 toneladas						
		Peso bruto total:		560 toneladas						
Simulación realizada para un tren de 590 toneladas brutas										
Km	P. control	Llegada	Salida	Vreal (km/h)	Consumo (kWh)	Consumo auxiliares (kWh)	E.disipada f.neum. (kWh)	E.disipada f.reos. (kWh)	E.disipada f.reg. (kWh)	E.aprob auxiliares (kWh)
8,60	B.M. Madrid Sur		00:00:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
620,99	Barcelona Sants	03:20:42		0,0	12.036,8	668,1	0,0	0,0	370,4	161,0
Composición del tren:		Locomotora 252		90 toneladas						
		Coche 2000		44 toneladas						
		1 Gusano		1x213 toneladas						
		Peso bruto total:		347 toneladas						
Simulación realizada para un tren de 390 toneladas brutas										
Km	P. control	Llegada	Salida	Vreal (km/h)	Consumo (kWh)	Consumo auxiliares (kWh)	E.disipada f.neum. (kWh)	E.disipada f.reos. (kWh)	E.disipada f.reg. (kWh)	E.aprob auxiliares (kWh)
8,60	B.M. Madrid Sur		00:00:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
620,99	Barcelona Sants	03:16:46		0,0	8.601,2	654,8	0,0	0,0	380,0	170,0

4.2. Ubicaciones idóneas para las terminales

Los trenes del **Proyecto VANELECTRA** requieren adaptar las terminales donde vayan a realizarse las tareas de carga y descarga, preparando los accesos rodados adecuados hasta las vías de estacionamiento del tren, y facilitando su encaminamiento hacia la LAV Madrid-Barcelona.

- Terminal en Barcelona: BARCELONA - MOROT

Barcelona-Morot es la dependencia de ADIF que da servicio a las instalaciones del puerto de Barcelona. El acceso desde la LAV Madrid-Barcelona se realiza por la actual Bifurcación Can Tunis. El acceso rodado se consigue gracias a la B-10 (ronda Litoral).

- Terminal en Madrid: B.A. MADRID - SUR

Madrid-Sur es una base de mantenimiento situada en el P.K. 8,60 de la línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona. Para el acceso rodado, las ventajas principales de la ubicación propuesta son, en primer lugar, la cercanía a las autovías de circunvalación de Madrid M-40 y M-45, así como a las autovías de Andalucía (A-4), y M-31. En segundo lugar, la proximidad de la plataforma logística Mercamadrid.



Figura 6: Carga de un tren **VANELECTRA** en una terminal adaptada a tal efecto.

5. Beneficios del Proyecto VANELECTRA

5.1. Beneficios en la explotación ferroviaria

Los servicios **VANELECTRA** pueden funcionar también como exploradores la LAV Madrid-Barcelona, ahorrando circulaciones técnicas.

5.2. Beneficios globales en el sistema de transporte

Sustitución del uso de combustibles fósiles por energía eléctrica en el traslado de mercancías, disminuyendo la emisión de gases contaminantes a la atmósfera.

Recarga de las baterías a la red durante la noche, utilizando un periodo valle en la demanda eléctrica, a un coste eléctrico menor que en las franjas diurnas.

Este hecho estabiliza el sistema eléctrico español y contribuye a posibilitar el uso de EERR en horarios nocturnos, aumentando aún mas la eficiencia global de todo el sistema.

El precio de la recarga es inferior al uso de combustibles fósiles.

Reducción del tráfico en las carreteras y del número de accidentes.

Referencias

- [1] ADIF (2013) Declaración de red.
- [2] De Ron Riñon, Verónica (2004). Oportunidades para el Transporte de Paquetería Urgente por las Líneas Ferroviarias de Alta Velocidad.
- [3] Enguix i Peiró, J.C. (2011). Experiencias internacionales no aplicadas en España en el transporte de mercancías por ferrocarril.
- [4] García Álvarez, A. (2007). Dinámica de los trenes en alta velocidad. *Explotación técnica y económica de ferrocarriles*.
- [5] García Álvarez, A. et Martín Cañizares, M^aP. (2007). Estandarización de los consumos energéticos y emisiones de los trenes de viajeros. *Investigación FFE. Fundación de Ferrocarriles Españoles*
- [6] García Álvarez, A. et Martín Cañizares M^aP. (2008). Consumo y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril. *Monográfico 16 Enertrans*
- [7] García Álvarez, A. (2009) Energía y trazado ferroviario. *Investigación FFE. Fundación de Ferrocarriles Españoles*.
- [8] López Pita, A. (2008). Explotación de líneas de ferrocarril. *Universidad Politécnica de Barcelona UPC*.

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.

julio 2013
número 6

Estudio del comportamiento de materiales compuestos reforzados con fibra utilizados en el revestimiento de vehículos ferroviarios

Sistema de inspección de pantógrafos de trenes mediante visión artificial

Sistema de prueba de freno en estaciones de clasificación de vagones de mercancías

Estudio del desgaste ondulatorio de una vía con mantas resilientes bajo placa de hormigón mediante el análisis de su comportamiento vibratorio

Evaluación de la repercusión económica ligada al coste energético de las limitaciones de velocidad por precauciones en las líneas férreas

Nueva red ferroviaria del corredor mediterráneo

Simulación de accesibilidad a vehículos ferroviarios

Proyecto VANELECTRA: Transporte de mercancías ligeras por líneas ferroviarias de altas prestaciones



**FUNDACIÓN DE LOS
FERROCARRILES
ESPAÑOLES**

www.ffe.es

Número 6. Monográfico con los trabajos galardonados en el "II Premio Tria Railway RD para Jóvenes Ingenieros Ferroviarios"



tria
RAILWAY R&D