

N  
O  
V  
I  
E  
N  
D  
I  
C  
I  
E  
N  
D  
A

técnica

# vía libre

## TÉCNICA

### INVESTIGACIÓN

### FERROVIARIA

Número 2



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
SPAÑOLES

[www.ffe.es](http://www.ffe.es)

Diciembre 2011

Edita:



**Consejo asesor:**

Emilio Larrode  
Universidad de Zaragoza

José Luis López Gómez  
Premio TALGO

Sergio Lopez Lara  
Director General TRIA Railway R&D

Andrés López Pita  
Aula COMSA

Eduard Rodés  
Director Escola Europea de Short Sea Shipping

Eduardo Romo  
Fundación Caminos de Hierro

**Consejo de redacción:**

Jaime Barreiro Gil (Director editorial, FFE)  
Alberto García Álvarez (FFE)  
Juan Manuel Jiménez Aguilar (FFE)  
Pilar Lozano Carbayo (FFE)  
Miguel Jiménez Vega (FFE)  
Jose Mariano Rodríguez (Secretario FFE)  
Antonio Berrios (ADIF)

**Vía Libre Técnica - Investigación Ferroviaria**

Vía Libre Técnica - Investigación Ferroviaria es una publicación digital que acoge artículos, estudios y comunicaciones de investigación en el mundo del ferrocarril, entendida en un sentido amplio.

Los artículos que se recogen responden a diversos ámbitos, temáticas y niveles de la I+D+i, siempre en relación con el ferrocarril.

Las materias tratadas son diversas y afectan tanto a infraestructura como a material rodante, explotación, gestión, etc. También los artículos son de diferente tipo: artículos de investigación básica, investigación aplicada, trabajos universitarios, divulgación de experiencias novedosas, etc.

Nuestra intención, con esta iniciativa, es apoyar el mundo de la investigación en el sector, ofreciendo un ámbito de publicación, que estimule a investigadores y empresas.

Agradecemos desde estas páginas es esfuerzo del mundo de la investigación ferroviaria y, en particular, a todos aquellos que nos han enviado sus artículos.

**Edita:**

Fundación de los Ferrocarriles Españoles  
Secretaría de redacción: Leticia García  
ISSN: 2174-0194

## SUMARIO

<b>El aprovechamiento de equilibrio. Una herramienta para la orientación o la competitividad y la búsqueda de sostenibilidad económica de los servicios de transporte de viajeros por ferrocarril .....</b>	<b>7</b>
<i>Manuel Jesús Megía Puente</i>	
<b>Energía y trazado ferroviario .....</b>	<b>21</b>
<i>Alberto García Álvarez - Fundación de los Ferrocarriles Españoles</i>	
<b>Desarrollo de un modelo de predicción de discomfort acústico en coches de vehículos de alta velocidad .....</b>	<b>33</b>
<i>Oriol Gilbert - Alstom Transport, Juan Sapena - Alstom Transport, Begoña Mateo - Instituto de Biomecánica de Valencia, Nicolás Palomares - Instituto de biomecánica de Valencia</i>	
<b>Tecnologías para el transporte urbano: los tranvías y metros ligeros .....</b>	<b>39</b>
<i>Oscar Martínez Álvaro</i>	
<b>Modelización de la interacción vía-tranvía .....</b>	<b>47</b>
<i>Susana Anacleto Lupiáñez</i>	
<b>Estudio del comportamiento vibratorio de diferentes tipologías de vía en ámbito urbano en la línea 4 del tranvía de Alicante .....</b>	<b>61</b>
<i>Vicente Puig Garcés - GTP, Miguel Ramos Carrera - GTP, Julia Real Herráiz - Universidad Politécnica de Valencia, Pablo Martínez Fernández - Universidad Politécnica de Valencia, Laura Montalbán Domingo - Universidad Politécnica de Valencia, Alberto Galisteo Cabeza - Universidad Politécnica de Valencia, Antonio Villanueva Segarra - INECO</i>	

## SUMMARY

### **Balanced use, a tool for the orientation towards competitiveness and search for economical sostenibility of railway passengers transportation services** .....

7

*Manuel Jesús Megía Puente*

Abstract: In the context of increasing exigency generated by the rising of intramodal concurrency in the railway transport market, railway companies need to fit analytical methodologies for helping them to orient operative decisions for going forward in their competitiveness and economic sustainability levels. Nevertheless, the ranking only based in margin or coverage has not enough precision. To avoid this difficulty it is proposed I this paper the introduction of the Balanced Use concept.

The Balanced Use can be defined as the value of the offer use ( $vk / pk$ ) that will permit equilibrate the total unit cost for the production or generation of a seat.kilometer ( $pk$ ) with the overall unit average income per carried passenger.kilometer ( $vk$ ).

keywords: Balanced operation, Use of supply, Economic performance, Resource optimization, Rail services competitiveness, Economic sustainability.

### **Energy and railway lines** .....

21

*Alberto García Álvarez*

Abstract: This paper examines the relationship between the railway lines drawing and energy consumption by the trains that use them.

First of all, the paper shows that investments in the construction of new railway lines and improving existing ones often justified by the reduction of fuel consumption and emissions of the whole transport system. It should therefore be taken into account in the design of necessary conditions to achieve this objective. And to achieve this is necessary, first, reduce its consumption, but also (and especially) make it attractive in terms of average speed to be able to attract travelers from other transport modes, especially aircraft and automobile. In this sense, in opinion of the author, only a small part of the energy savings and emissions attributable to the high speed train comes from the fact that it consumes less energy than the conventional train (due to the difference of tracks). Most of the energy savings comes from the high speed train (thanks precisely to the lure that gives it its speed) is able to capture many of passengers from the aircraft and private cars.

keywords: energy consumption, railway line drawing, energy saving and energy efficiency, speed.

### **Development of a prediction model of acoustic discomfort in high-speed train passenger cars** .....

33

*Oriol Gilbert, Juan Sapena, Begoña Mateo, Nicolás Palomares.*

Abstract: Acoustic perception is considered as one of the most important factors in the comfort assessment in high-speed vehicles.

The present study is focused in a research project developed by ALSTOM Transport and the Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) with the objective of generate a prediction model of interior noise acoustic discomfort in high-speed train passenger cars.

keywords: Sound Quality, Psychoacoustics, Acoustic Comfort.

**Technologies for urban transport: trams and light subways** ..... 39

*Oscar Martínez Álvaro*

Abstract: The gradual disappearance of the streetcars in the mixt-sixties has not prevented we are witnesses of a renaissance today. Beyond all countries, France leads the impulse towards the implantation of this way of transport. Optimizing the balance between the consistent advantages and disadvantages is the governments' main aim. Economic, environmental and utilization aspects intermingle in the obligatory analyses which must be carried out in order to this transport is the best to shift.

keywords: tramways, advantages, disadvantages, visual impact, technologies, energy consumption, economic costs, mixed systems, evaluation.

**Modelization of the Track-Tramway Interaction** ..... 47

*OSusana Anacleto Lupiáñez*

Abstract: In spite of tramway infrastructure's spread over the last few years, all the countries having a tramway or a light rail network suffer from lack of specific standards for the construction and the maintenance of their superstructure. This fact has lead to practices as the direct adoption or the extrapolation of geometric limit values from conventional railways, but it does not exists any clear criteria to justify the tolerances that are finally demanded to tramway constructors.

Among the main goals of this thesis, there is the definition of a methodology which allows to estimate appropriate limit values starting from a geometric track defect record. These geometric tolerances must be defined fulfilling the condition of guaranteeing certain level of vehicle ride comfort. The application of comfort criteria to the calculation of track defects' limit values is precisely the original piece of this study, since the criterion of security (risk of derailment) is the one which traditionally governs track quality standards.

keywords: railway engineering, geometry, track, tramway, track-tramway interaction, geometric tolerances, comfort

**Study of the vibrational behavior of different track types in urban area in line 4 of the Alicante Tram** ..... 61

*Vicente Puig Garcés, Miguel Ramos Carrera, Julia Real Herráiz, Pablo Martínez Fernández, Laura Montalbán Domingo, Alberto Galisteo Cabeza, Antonio Villanueva Segarra*

Abstract: This paper details the measurement campaign carried out by the Universidad Politécnica de Valencia in the line 4 of Alicante's Tram Network. This campaign aims to study the behaviour of different track typologies and elements with regards to vibration so as to assess their efficiency. The paper shows the campaign planning, the sensors used and the measurement and processing schemes adopted. The main results are thoroughly discussed, being the most relevant a clear superiority of the slab track typology when compared to the green track in terms of vibration alleviation.

keywords: vibrations, tram, slab track, green track.



## **El aprovechamiento de equilibrio. Una herramienta para la orientación a la competitividad y la búsqueda de sostenibilidad económica de los servicios de transporte de viajeros por ferrocarril**

### ***Balanced use, a tool for the orientation towards competitiveness and search for economical sostenibility of railway passengers transportation services***

Manuel Jesús Megía Puente\*

#### **Resumen**

En el contexto de exigencia creciente que promueve la aparición de la competencia intramodal en el mercado de transporte por ferrocarril, las empresas ferroviarias necesitan poner a punto metodologías de carácter analítico que ayuden a orientar las decisiones operativas para avanzar en sus niveles de competitividad y sostenibilidad económica. Sin embargo, la clasificación simplemente basada en el margen o la cobertura carece de la suficiente precisión para servir de orientación adecuada. Para obviar esa dificultad se propone la introducción del concepto de Aprovechamiento de Equilibrio.

El Aprovechamiento de Equilibrio se puede definir como el valor del aprovechamiento de la oferta ( $vk / pk$ ) que permitiría compensar el coste total unitario de producción de una plaza.kilómetro ( $pk$ ) con el ingreso total promedio unitario por viajero.kilómetro ( $vk$ ) transportado.

*Palabras clave: Equilibrio de la explotación, Aprovechamiento de la oferta, Rendimiento económico, Optimización de recursos, Competitividad del ferrocarril, Sostenibilidad económica.*

#### **Abstract**

*In the context of increasing exigency generated by the rising of intramodal concurrency in the railway transport market, railway companies need to fit analytical methodologies for helping them to orient operative decisions for going forward in their competitiveness and economic sustainability levels. Nevertheless, the ranking only based in margin or coverage has not enough precision. To avoid this difficulty it is proposed I this paper the introduction of the Balanced Use concept.*

*The Balanced Use can be defined as the value of the offer use ( $vk / pk$ ) that will permit equilibrate the total unit cost for the production or generation of a seat.kilometer ( $pk$ ) with the overall unit average income per carried passenger.kilometer ( $vk$ ).*

*keywords: Balanced operation, Use of supply, Economic performance, Resource optimization, Rail services competitiveness, Economic sustainability.*

\* [mjmegia@renfe.es](mailto:mjmegia@renfe.es)

## **1. Introducción**

La aparición de la competencia intramodal en el mercado de transporte por ferrocarril, que ha sido promovida en el ámbito europeo por la Comisión de la Unión Europea como elemento de adaptación al escenario general de evolución de la economía mundial en el cambio de milenio, implica que las empresas ferroviarias se hayan visto obligadas a incorporar entre sus objetivos estratégicos y de gestión capitales el de lograr los adecuados niveles de competitividad que las permitan mantenerse en un mercado cada vez más liberalizado.

La exigencia de competitividad en general y para las empresas ferroviarias en particular se ha convertido, además, en una demanda social, institucional y política generalizada en el ámbito de los países desarrollados y en el contexto económico del primer decenio del siglo XXI, ya que, cada vez más, la tendencia es a que los servicios que se ofrecen a los ciudadanos lo sean en un contexto de sostenibilidad económica que se garantice desde las propias organizaciones que producen tales servicios.

En línea con lo anterior, la mayoría de las empresas ferroviarias europeas están cambiando su modelo empresarial desde el tradicional de empresa pública, sin ánimo de lucro y, con una preocupación moderada en relación con el equilibrio de sus cuentas de resultados, hacia el régimen de empresa mercantil que incorpora objetivos económicos de equilibrio o, incluso, de generación de un pequeño nivel de beneficios, para asegurar su autocontinuidad sin depender de los presupuestos públicos.

Como la filosofía de la autosostenibilidad económica de las empresas del sector ferroviario afecta igualmente a las empresas operadoras de transporte y a las que administran y gestionan la infraestructura, el sistema incorpora entre sus reglas del juego la necesidad de que los operadores de transporte asuman la obligación del pago por el uso de las infraestructuras sobre las que realizan su actividad. Este pago representa un desafío importante para las empresas ferroviarias, sobre todo en relación con los servicios de Alta Velocidad, que deben de hacer frente a cuantías económicas de un volumen significativo (según los países) con incidencia relevante en sus correspondientes cuentas de resultados.

La vigencia de estos desafíos se confirma por la actitud generalizada en el sector, representado por las diferentes organizaciones que agrupan a distintos subsectores del mismo; en este sentido es interesante reseñar que CER (operadores), EIM (administradores y gestores de infraestructura) y Unife (constructores de material rodante) han demandado que el Libro Blanco del Transporte 2010 refleje para el ferrocarril: Necesidad de competencia efectiva; Política de tarificación eficaz para todos los modos; Eliminación de los cuellos de botella en la infraestructura.

Por lo que respecta a la sostenibilidad económica de los sistemas ferroviarios, ha sido tradicionalmente un punto débil, sobre todo en el caso de los sistemas basados en las empresas ferroviarias nacionales, consideradas como “pozos sin fondo” de drenaje de recursos económicos públicos. Por lo tanto, es un desafío formidable para el sector de transporte por ferrocarril borrar con hechos objetivos esa imagen de ineficiencia, demostrando a la sociedad y a los ciudadanos que las empresas ferroviarias del siglo XXI pueden ser eficientes desde el punto de vista económico; por otra parte, este es el objetivo central de la Comisión de la Unión Europea en su proyecto de revitalización del transporte ferroviario en su ámbito de influencia.

Actualmente el mundo desarrollado se encuentra sumido en una crisis económica desatada a partir de 2007 cuya solución definitiva no se vislumbra con claridad y que está teniendo múltiples efectos ya manifiestamente perceptibles en mayor o menor medida, según los casos, en el tejido económico, empresarial y social de los diferentes países; uno de tales efectos es un retroceso en relación con los niveles de “estado del bienestar” alcanzados que se traducen, entre otros aspectos, en una disminución en la práctica de la dimensión económica del Estado y en una mayor exigencia en relación con la eficiencia de los sistemas, organizaciones y empresas relacionadas con la prestación de servicios considerados de interés público como es, en muchos casos, el servicio de transporte de viajeros por ferrocarril.

Esta crisis está cambiando los escenarios de referencia en materia de planificación de infraestructuras, al laminar, retrasar o anular las inversiones previstas en nuevas infraestructuras ferroviarias o en modernización y ampliación de las existentes, pero también en el nivel de servicios que las Administraciones se plantean ofrecer a los ciudadanos; en este contexto el desafío para las empresas ferroviarias y para el conjunto del sector está en aparecer, de forma objetiva, ante los poderes públicos como la mejor opción frente a otros modos en competencia para ofrecer soluciones eficientes para la prestación de servicios de transporte a los ciudadanos con los niveles de calidad exigidos y a un coste asumible para el sistema económico del país de que se trate.

De forma particular, en el caso español, el Estado muestra una especial preocupación por asegurar la prestación de los servicios públicos de transporte de viajeros por ferrocarril, pero garantizando a la vez el más bajo nivel de coste posible. En ese sentido, el Consejo de Ministros de 30 de diciembre de 2010 aprobó el acuerdo que establece las “obligaciones de servicio público” (OSP) de los servicios de transporte ferroviario de viajeros que hasta entonces prestaba RENFE-Operadora en la Red Ferroviaria de Interés General. Hasta ese momento, el Contrato-Programa suscrito entre Renfe y la Administración General del estado 2006-2010 había servido como marco financiero presupuestario para favorecer la prestación de estos servicios con calidad, estableciendo los objetivos, obligaciones y compromisos mutuos entre el Estado y Renfe.

Así, quedaron garantizados durante 2011 los servicios de Cercanías y Media Distancia que presta Renfe. En el siguiente año, el Ministerio de Fomento y las Comunidades Autónomas han de definir el marco apropiado para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sistema de transporte de Media Distancia. El objetivo final es consensuar junto con las Administraciones autonómicas las decisiones pertinentes que garanticen el equilibrio económico de la explotación de los servicios.

El establecimiento de las “obligaciones de servicio público” de los servicios de transporte ferroviario de viajeros se realiza en cumplimiento del Reglamento (CE) 1370/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007. Esta norma europea regula el régimen de los servicios públicos de transporte de viajeros por ferrocarril y carretera y tiene por objetivo establecer las reglas, en virtud de las cuales las Administraciones Públicas pueden intervenir en el sector del transporte público de viajeros para garantizar los servicios de interés general en unas condiciones de frecuencia, calidad y precio que el simple juego de mercado no hubiera permitido prestar.

En este contexto de exigencia creciente, las empresas ferroviarias necesitan poner a punto metodologías, procedimientos y procesos de carácter analítico que ayuden a orientar con el necesario rigor las decisiones operativas para avanzar en sus niveles de competitividad y sostenibilidad económica. En consecuencia, la clasificación de los servicios en función de sus resultados económicos es una actividad básica para el posterior análisis a fondo de tales servicios, llegando incluso hasta el nivel de relaciones y trenes

individuales. Sin embargo, la clasificación simplemente basada en el margen o la cobertura, por rigurosa que sea, carece con carácter general de la suficiente precisión para servir de orientación adecuada. Para obviar esa dificultad se propone la introducción del concepto de Aprovechamiento de Equilibrio, que hace intervenir no solo indicadores económicos (ingresos y gastos), sino también los valores del aprovechamiento de la oferta, expresado como relación entre los viajeros.kilómetro transportados y las plazas.kilómetro producidas.

## 2. El concepto de aprovechamiento de equilibrio

El Aprovechamiento de Equilibrio se puede definir como el valor del aprovechamiento de la oferta ( $vk / pk$ ) que permitiría compensar el coste total unitario de producción de una plaza.kilómetro ( $pk$ ) con el ingreso total promedio unitario por viajero.kilómetro ( $vk$ ) transportado.

El Coste por plaza.kilómetro ofrecida o puesta en el mercado, nos ilustra respecto al nivel de eficiencia en la producción del servicio, permitiendo profundizar posteriormente en el análisis de los elementos de la oferta que se incorporan en ese coste unitario y como influye cada uno de ellos. Conviene recordar que en el sector del transporte de viajeros, la plaza.kilómetro es la unidad de producto que producen las empresas, que se convierte automáticamente en viajero.kilómetro cuando es comprada por un cliente, y que se destruye, también automáticamente, si no se consigue venderla; es decir, la industria del transporte no puede almacenar los excedentes de producto no vendidos.

La definición propuesta se apoya en los siguientes conceptos y expresiones previas:

Percepción media por viajero.kilómetro transportado:  $Pm = It / vk$  (€/vk)

It: Ingresos de tráfico (o totales)  
vk: viajeros.kilómetro

Coste unitario por plaza.kilómetro producida:  $Cu = Gt / pk$  (€/pk)

Gt: Gastos totales  
pk: plazas.kilómetro

Por ello:

**Aprovechamiento de equilibrio (%):**  $Ae = Cu / Pm = (Gt / pk) / (It / vk)$   
 $= (vk / pk) / (It / Gt)$ , y puesto que:

Aprovechamiento:  $A = vk / pk$  (%)  
Cobertura:  $C = It / Gt$  (%), tenemos también:

**Aprovechamiento de equilibrio (%):**  $Ae = A / C$ , es decir, el aprovechamiento de equilibrio puede expresarse también como el cociente entre el aprovechamiento de la oferta y la cobertura de gastos por ingresos.

En ambos casos el Aprovechamiento de Equilibrio asegura que los ingresos igualan a los Gatos, es decir:  $I_{te} = G_{te}$ , siendo  $I_{te}$  y  $G_{te}$  ingresos y gastos totales en la situación de equilibrio.

Alternativamente, podríamos definir el Aprovechamiento de Equilibrio como el valor del aprovechamiento de la oferta que permitiría compensar el coste total de producción de todas las plazas.kilómetro ofertadas por un Operador de transporte de viajeros por ferrocarril determinado con los ingresos totales obtenidos por ese Operador por todos los conceptos, incluyendo tanto los ingresos de tráfico, directamente relacionados con los viajeros.kilómetro realizados, como otros ingresos adicionales no directamente relacionables con el volumen de transporte de viajeros realizado.

Esta segunda definición se apoya en los siguientes conceptos y enunciados previos:

Ingresos totales:  $I = I_{tr} + CPS + RI$

$I_{tr}$ : Ingresos de tráfico

$$I_{tr} = P_m * v_k$$

$P_m$ : Percepción media

$v_k$ : Demanda (viajeros.kilómetro), también:

$$P_m = I_{tr} / v_k$$

CPS: Compensación por servicio

RI: Resto de ingresos; asumiremos que, para cada caso determinado, el resto de ingresos puede expresarse como una cierta porción, expresada mediante el coeficiente alfa ( $a$ ), de los ingresos totales

$$RI = a * I, \text{ siendo } a < 1$$

Gastos totales:  $G = G_{ex} + RG$

$G_{ex}$ : Gastos variables de explotación

$$G_{ex} = C_u * p_k$$

$C_u$ : Coste unitario variable de explotación

$p_k$ : Oferta (plazas.kilómetro)

RG: resto de gastos; asumiremos que, para cada caso determinado, el resto de gastos puede expresarse como una cierta porción, expresada mediante el coeficiente beta ( $b$ ), de los gastos totales

$$RG = b * G, \text{ siendo } b < 1$$

Resultado:  $R_{do} = I - G$

En la situación de equilibrio:

Resultado de equilibrio:  $R_{doe} = 0$  y

Compensación por servicio de equilibrio:  $CPS_e = 0$

$$\text{Por tanto: } 0 = I_{te} + RI - (G_{ex} + RG)$$

$I_{te}$ : Ingresos de tráfico de equilibrio

$$I_{te} = P_m * v_{ke}, \text{ y:}$$

$$P_m = I_{tr} / v_k$$

Puesto que:

Aprovechamiento:  $A = v_k / p_k$ , entonces:

Aprovechamiento de equilibrio:  $A_e = v_{ke} / p_k$ , luego:

$v_{ke} = A_e * p_k$ , además:

$G_{ex} + R_G = I - R_{do} = I_{tr} / v_k + CPS + RI - R_{do}$ , luego:

$P_m * v_{ke} + RI = P_m * v_k + CPS + RI - R_{do}$ , es decir:

$I_{tr} / v_k * A_e * p_k = I_{tr} / v_k * v_k + CPS - R_{do}$ , y:

$A_e = (v_k / p_k) * (1 + (CPS - R_{do}) / (P_m * v_k))$ , o sea:

**Aprovechamiento de equilibrio:  $A_e = A * (1 + (CPS - R_{do}) / I_{tr})$** , que expresa el concepto en función del aprovechamiento real, el Resultado de la Cuenta de Explotación, los ingresos de tráfico y la eventual compensación por servicio.

El Aprovechamiento de Equilibrio puede definirse igualmente para prever la obtención de un beneficio determinado por el operador del servicio. En ese caso la formulación sería la siguiente:

Aprovechamiento de equilibrio, teniendo en cuenta el beneficio deseado:

$$A_e' = C_u / P_m * (\%)$$

$C_u$ : Coste unitario por plaza.kilómetro =  $G_t / p_k$  (€/pk)

$G_t$ : Gastos totales

$p_k$ : plazas.kilómetro

$P_m'$ : Percepción media por viajero.kilómetro transportado, teniendo en cuenta el beneficio deseado =  $I_{tr}' / v_k$  (€/vk)

$I_{tr}'$ : Ingresos de tráfico (o totales) minorados en el importe del beneficio (B) que se desea incorporar =  $I_t - B = I_t * (1 - c)$

$I_t$ : Ingresos de tráfico (o totales)

B: beneficio =  $c * I_t$

c: porcentaje de beneficio deseado sobre los ingresos

$v_k$ : viajeros.kilómetro, con todo ello:

**Aprovechamiento de equilibrio, teniendo en cuenta el beneficio deseado:**

$$A_e' = (G_t / p_k) / (I_t * (1 - c) / v_k), \text{ es decir:}$$

**$A_e' = G_t * A / (I_t * (1 - c))$** , expresado en función de los gastos y los ingresos totales y del porcentaje de beneficio sobre los ingresos (c) que se desea considerar.

También:

Aprovechamiento de equilibrio, teniendo en cuenta el beneficio deseado:

$$Ae' = Cu' / Pm (\%)$$

Cu': Coste unitario por plaza.kilómetro producida, teniendo en cuenta el beneficio deseado  
=  $Gt' / pk$  (€/pk)

Gt': Gastos totales mayorados en el importe del beneficio (B) que se desea incorporar =  $Gt + B = Gt * (1 + d)$

Gt: Gastos totales

B: beneficio =  $d \times Gt$

d: porcentaje de beneficio deseado sobre los gastos

Pm: Percepción media por viajero.kilómetro =  $It / vk$  (€/vk)

It: Ingresos de tráfico (o totales)

pk: plazas.kilómetro, con todo ello:

### Aprovechamiento de equilibrio, teniendo en cuenta el beneficio deseado:

$Ae' = (Gt * (1 + d) / pk) / (It / vk)$ , es decir:

$Ae' = Gt * (1 + d) * A / It$ , expresado en función de los gastos y los ingresos totales y del porcentaje de beneficio sobre los gastos (d) que se desea considerar.

Ambas formulaciones son equivalentes: cuando los ingresos igualan a los gastos más el beneficio:  $It = Gt + B = Gt (1 + d)$ , o bien cuando los gastos igualan a los ingresos menos el beneficio:  $Gt = It - B = It * (1 - c)$ .

Una mejor aproximación a un modelo de ingresos-gastos-actividad podría tomar también en consideración los gastos asociados a la realización efectiva de viajeros.kilómetro (vk), que serían adicionales a los estrictamente necesarios para producir las plazas.kilómetro (pk) correspondientes; es decir, una vez producida una pk, con su gasto o coste asociado, si esa pk se utiliza, es decir, si se convierte en vk, el Operador ha de incurrir en unos costes adicionales que se evitarían si la pk no se utiliza; por ejemplo, energía efectivamente consumida en el transporte del viajero, cánones por viajero transportado, reparto de auriculares, periódicos, caramelos, refrescos, ...

La consideración de este criterio torna algo más complejas las expresiones aritméticas que soportan el modelo de decisión basado en el concepto de aprovechamiento de equilibrio:

Percepción media por viajero.kilómetro transportado:  $Pm = It / vk$  (€/vk)

It: Ingresos de tráfico (o totales)

vk: viajeros.kilómetro

Coste unitario por viajero.kilómetro transportado:  $K_{uvk}$ ; asumiremos que, para cada caso determinado, el coste unitario por  $vk$  transportado puede expresarse como una cierta porción, expresada mediante el coeficiente epsilon ( $e$ ), de los ingresos totales ( $It$ ):

$$K_{uvk} = e * It / vk, \text{ siendo } e < 1$$

Coste unitario por plaza.kilómetro producida:  $C_u = (Gt - e * It) / p_k$  (€/pk)

Gt: Gastos totales

e: coeficiente Epsilon

It: Ingresos totales

$p_k$ : plazas.kilómetro

Por ello:

**Aprovechamiento de equilibrio (%):**  $A_e = C_u / (P_m - K_{uvk}) = ((Gt - e * It) / p_k) / (It * (1 - e) / vk) = (vk / p_k) / (It * (1 - e) / (Gt - e * It))$ , y puesto que:

Aprovechamiento:  $A = vk / p_k$  (%)

Cobertura:  $C = It / Gt$  (%), tenemos también:

**Aprovechamiento de equilibrio (%):**  $A_e = A / C * (1 - C * e) / (1 - e)$ , es decir, el aprovechamiento de equilibrio puede expresarse también en función del aprovechamiento de la oferta y la cobertura de gastos por ingresos.

No obstante, en un primer nivel de exploración de la situación económica para un cierto conjunto de servicios podría obviarse tal precisión, habida cuenta, entre otras cosas, del grado de incertidumbre existente en relación con los datos de que generalmente se dispone para la realización de este tipo de análisis.

### 3. Diagnóstico basado en los valores del aprovechamiento de equilibrio

De una forma general, a partir del conocimiento de los valores del Aprovechamiento de Equilibrio ( $A_e$ ) para un conjunto de servicios, relaciones o trenes, y también de su comparación con los del aprovechamiento real ( $A$ ), es posible aplicar criterios de decisión basados en umbrales, como por ejemplo:

$A \geq A_e$ : servicio económicamente sostenible

$A < A_e$ : necesita estudio

$A_e \geq 90\%$ : servicio probablemente inviable

$A_e - A \leq 10\%$ : servicio reconducible, en principio

$10\% < A_e - A \leq 30\%$ : servicio muy problemático

De acuerdo con este esquema orientativo:

Las relaciones y o trenes con aprovechamiento de equilibrio igual o superior a un cierto umbral (90%, por ejemplo) solo se podrían mantener si fuesen incorporados al segmento de servicios de interés público.

Los trenes o relaciones con aprovechamiento de equilibrio inferior al 90% y margen negativo se podrían analizar en un espacio de decisiones de dos dimensiones (margen; aprovechamiento de equilibrio), con el objetivo básico de establecer un orden de prioridad en su análisis más profundo orientado a encontrar líneas de actuación para reconducir su situación económica.

La misma metodología podría utilizarse para fijar el orden de prioridad para su análisis en el caso de utilizar como uno de los criterios la diferencia entre el aprovechamiento real (A) y el aprovechamiento de equilibrio (Ae) de un conjunto de servicios (tanto relaciones, como trenes individuales) en estudio. En este caso se establecería una segmentación adicional para estudiar de forma separada los casos que hemos denominado más arriba como “reconducibles” ( $Ae - A \leq 10\%$ ) y los “muy problemáticos” ( $10\% < Ae - A \leq 30\%$ ).

De forma más específica y por lo que respecta a los valores absolutos del aprovechamiento (A) y del aprovechamiento de equilibrio (Ae) es posible establecer, por ejemplo, una escala de valores de carácter orientativo, como la siguiente:

- A  $\geq$  Ae: servicio económicamente sostenible
- A < Ae: servicio que necesita estudio
- A < 25%: demanda débil / servicio sobredimensionado
- 25% < A < 60%: servicio sobredimensionado
- 90% > A > 60%: servicio adecuado a la demanda
- A > 90%: servicio saturado
- Ae < 20%: datos probablemente erróneos
- 20%  $\leq$  Ae < 65%: servicio eficiente
- 90% > Ae > 65%: servicio ineficiente
- Ae > 90%: servicio probablemente inviable / datos erróneos

#### **4. Análisis de algunas posibilidades de actuación**

Una vez realizado el diagnóstico correspondiente al servicio, relación o tren individual se procedería a identificar actuaciones que conduzcan a una disminución del valor del aprovechamiento de equilibrio, o a una reducción de la diferencia entre el aprovechamiento de equilibrio y el aprovechamiento real, explorando, entre otras, las siguientes posibilidades:

Aumento del aprovechamiento real: más viajeros o mayor recorrido medio por viajero

Reducción de la oferta: menos servicios / menos plazas por tren

Disminución del coste por plaza.kilómetro:

reducción del coste de producción: aumento de productividad de los recursos

aumento de eficiencia: reducción de costes no ligados directamente a la producción del servicio de transporte

Incremento del ingreso por viajero.kilómetro: aumento de precios o tarifas

## 5. Análisis de sensibilidad del valor del aprovechamiento de equilibrio a la variación de ciertas magnitudes

A partir de la expresión:  $Ae = A * (1 + (CPS - Rdo) / Itr)$ , deducida más arriba para el aprovechamiento de equilibrio en función del aprovechamiento real (A), el Resultado de la Cuenta de Explotación (Rdo), los ingresos de tráfico (Itr) y la eventual compensación por servicio (CPS), se ha realizado un ejercicio de análisis de sensibilidad respecto a la variación de los valores del aprovechamiento de equilibrio en función de los cambios para un conjunto de datos que podrían ser representativos para un operador típico de servicios de transporte de viajeros por ferrocarril. Se han explorado variaciones del +/- 1% en las siguientes magnitudes:

- Compensación por Servicio (CPS)
- Coefficiente alfa (a)
- Coefficiente beta (b)
- Oferta (pk)
- Demanda (vk)
- Percepción media (Pm)
- Coste unitario de explotación (Cu)

Los resultados de tal análisis de sensibilidad han puesto de manifiesto lo siguiente (figura 1):

Conceptos	Base	cambio (%)	Cambio global	variación	diferencia	cambio Ae
Ingresos totales [I] (10e3 €)	1.636.796		1.666.749	1,8%	29.953	
Ingresos de tráfico [Itr] (10e3 €)	1.204.898		1.229.117	2,0%	24.218	
Compensación por servicio [CPS] (10e3 €)	355.296	1	358.849	1,0%	3.553	-0,01
Resto de ingresos [RI] (10e3 €)	76.602		78.784	2,8%	2.182	
coeficiente alfa [a]	0,05	1	0,05	1,0%	0,000	-0,03
resultado [Rdo] (10e3 €)	-15.854		57.714	-464,0%	73.568	
Gastos totales [G] (10e3 €)	1.652.651		1.609.036	-2,6%	-43.615	
coeficiente beta [b]	0,40	-1	0,40	-1,0%	-0,004	-0,37
Gastos variables de explotación [Gex] (10e3 €)	991.590		971.858	-2,0%	-19.733	
Resto de gastos [RG] (10e3 €)	661.060		637.178	-3,6%	-23.882	
oferta (10e6 pk)	34.781	-1	34.433	-1,0%	-348	-0,03
percepción media [Pm] (€/vk)	0,0844	1	0,0853	1,0%	0,00084	-0,55
demanda (10e6 vk)	14.270	1	14.412	1,0%	143	-0,02
coste variable unitario de explotación [Cu] (€/pk)	0,0285	-1	0,0282	-1,0%	-0,00029	-0,56
aprovechamiento [A]	41,0%		41,9%	2,02%	0,83	
aprovechamiento de equilibrio [Ae]	53,7%		52,1%	-2,90%	-1,55	
diferencia entre aprovechamientos (Ae-A puntos)	12,6		10,3			

Valores de cambio para estudio

Lo más eficaz para disminuir el valor del aprovechamiento de equilibrio sería disminuir el coste variable unitario de explotación (Cu: coste por pk)

Lo siguiente más eficaz sería aumentar la percepción media real (Pm: €/vk)

En tercer lugar, con un 70% de eficacia respecto a los dos anteriores, estaría disminuir el peso de los gastos fijos sobre los gastos totales (coeficiente beta (b)); condicionado al peso relativo de esos gastos fijos sobre los totales

Otras medidas tienen una eficacia del orden del 5% o inferior respecto a las dos más eficaces:

Disminución de la oferta (pk)

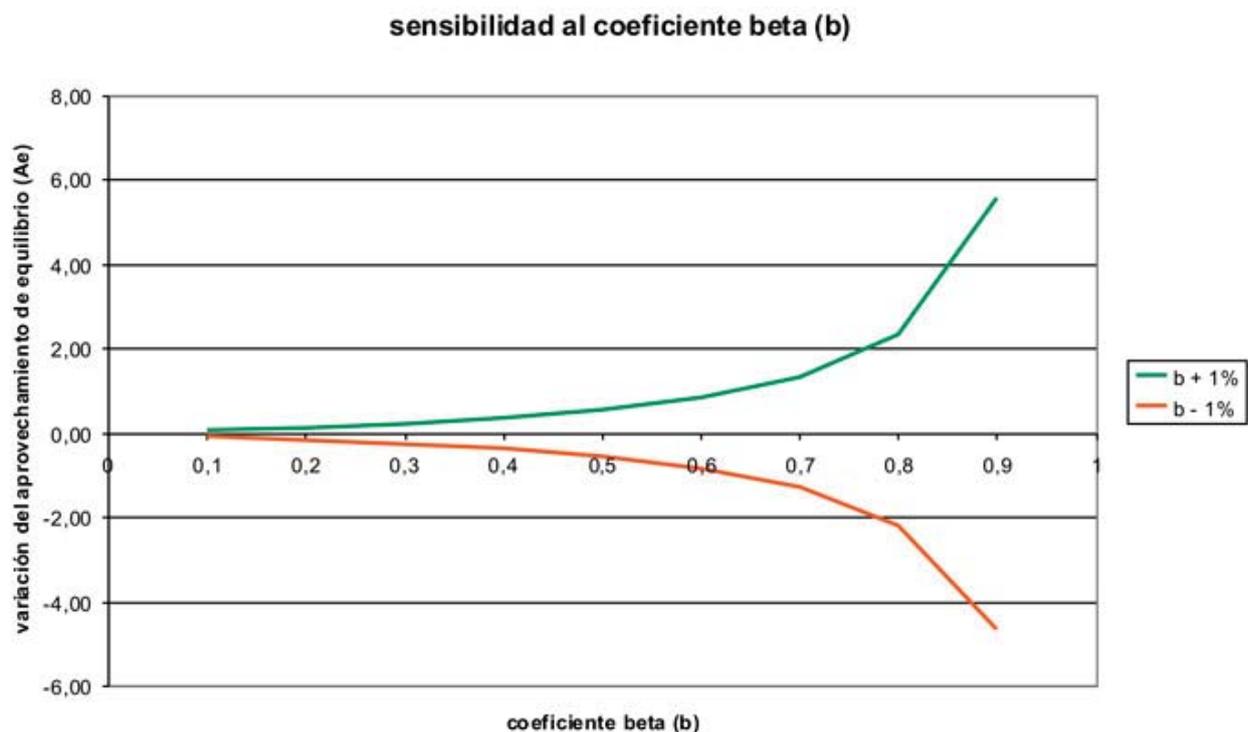
Disminución del peso de resto de ingresos respecto a los ingresos totales (coeficiente alfa (a)); condicionado al peso relativo de esos ingresos respecto a los totales

Aumento de la demanda (vk)

Aumento de la compensación por servicios (CPS)

La figura 2 ilustra la variación de los valores del aprovechamiento de equilibrio para un cambio del +/- 1% en el valor del coeficiente beta (b), en función del valor absoluto inicial de ese coeficiente beta (b):

Se aprecia con claridad el efecto más que lineal de la variación de este coeficiente beta (b), que representa el peso de los gastos fijos sobre los gastos totales, conforme su valor inicial es mayor.



## **6. Conclusiones**

La aparición de la competencia intramodal en el mercado de transporte por ferrocarril implica que las empresas ferroviarias se hayan visto obligadas a incorporar entre sus objetivos estratégicos y de gestión el de lograr los adecuados niveles de competitividad.

En este contexto de exigencia creciente, las empresas ferroviarias necesitan poner a punto metodologías de carácter analítico que ayuden a orientar las decisiones operativas para avanzar en sus niveles de competitividad y sostenibilidad económica. Sin embargo, la clasificación simplemente basada en el margen o la cobertura carece de la suficiente precisión para servir de orientación adecuada. Para obviar esa dificultad se propone la introducción del concepto de Aprovechamiento de Equilibrio.

El Aprovechamiento de Equilibrio se puede definir como el valor del aprovechamiento de la oferta ( $vk / pk$ ) que permitiría compensar el coste total unitario de producción de una plaza.kilómetro ( $pk$ ) con el ingreso total promedio unitario por viajero.kilómetro ( $vk$ ) transportado.

Se ha puesto de manifiesto la posibilidad de establecer varias expresiones aritméticas para materializar el concepto de aprovechamiento de equilibrio en función de diferentes magnitudes características de la actividad, comercial, económica y técnica, de un operador de transporte de viajeros por ferrocarril.

De una forma general, a partir del conocimiento de los valores del Aprovechamiento de Equilibrio para un conjunto de servicios, relaciones o trenes, y de su comparación con los del aprovechamiento real es posible aplicar criterios de decisión basados en umbrales.

Una vez realizado el diagnóstico correspondiente al servicio, relación o tren individual queda abierta la puerta para identificar actuaciones que conduzcan a una disminución del valor del aprovechamiento de equilibrio, o a una reducción de la diferencia entre el aprovechamiento de equilibrio y el aprovechamiento real.

Asimismo, es posible llevar a cabo ejercicios de análisis de sensibilidad utilizando un conjunto de datos que podrían ser representativos para un operador típico de servicios de transporte de viajeros por ferrocarril, explorando el efecto de cambios en las diferentes magnitudes características de la actividad, comercial, económica y técnica del operador de que se trate sobre la variación de los valores del aprovechamiento de equilibrio de tal operador. Este análisis de sensibilidad permite identificar las actuaciones más eficaces en términos de disminución del valor del aprovechamiento de equilibrio:

Disminuir el coste variable unitario de explotación (coste por plaza.kilómetro)

Aumentar la percepción media real (ingreso por viajero.kilómetro)

Disminuir el peso de los gastos fijos sobre los gastos totales

En relación con este último indicador, se pone de manifiesto con claridad el efecto más que lineal sobre la variación de los valores del aprovechamiento de equilibrio del cambio en el valor del coeficiente que representa el peso de los gastos fijos sobre los gastos totales conforme su valor inicial es mayor.

## **7. Bibliografía**

MEGIA PUENTE, Manuel José, “Los desafíos del ferrocarril actual”, sección en: Master en Sistemas Ferroviarios. 10ª edición, curso 2011-2012; Módulo 2: Gestión y Explotación; Asignatura: Regulación y Economía del Sector Ferroviario; Sesiones 1 y 2: Introducción general al Mundo del Ferrocarril. Septiembre 2011

MEGIA PUENTE, Manuel José, “El concepto de aprovechamiento de equilibrio”, sección en: XXV Curso General de Transportes Terrestres, Área IV: Organización y Gestión del Servicio de Transporte Terrestre, Capítulo 2: Aspectos Económicos y Financieros, Sesión 2ª: Los Planes y Contrato-Programa. Mayo 2011

INTERESA INFORMATIVO, “Determinadas las Obligaciones de Servicio Público de los servicios de Cercanías y Media Distancia por el Ministerio de Fomento”. 30/12/2010



## Energía y trazado ferroviario

### *Energy and railway lines*

Alberto García Álvarez\*

#### Resumen

En el presente trabajo se analizan las relaciones entre el trazado de las líneas ferroviarias y el consumo de energía por parte de los trenes que las utilizan.

Se expone, en primer lugar, que las inversiones en la construcción de nuevas líneas ferroviarias y en la mejora de las existentes se justifican en muchas ocasiones por la reducción del consumo y de las emisiones del conjunto del sistema de transporte. Por ello es conveniente tener en cuenta en el diseño de los trazados las condiciones necesarias para lograr este objetivo. Y para conseguirlo es necesario, por una parte, lograr que el consumo del ferrocarril sea reducido; pero también (y sobre todo) que el ferrocarril resulte atractivo en términos de velocidad media, para que sea capaz de atraer viajeros de otros modos de transporte, especialmente del avión y del automóvil. En este sentido, según estudios del autor, solo una pequeña parte de los ahorros de energía y de emisiones atribuibles al tren de alta velocidad proceden del hecho de que éste consume menos energía que el tren convencional al que sustituye (lo que, por cierto se debe, en buena parte a la diferencia de los trazados). La mayor parte del ahorro energético procede de que el tren de alta velocidad (gracias precisamente al atractivo que le otorga su rapidez) es capaz de captar muchos viajeros del avión y del coche particular.

*Palabras clave: consumo de energía, trazado de líneas ferroviarias, ahorro y eficiencia energética, velocidad*

#### Abstract

*This paper examines the relationship between the railway lines drawing and energy consumption by the trains that use them.*

*First of all, the paper shows that investments in the construction of new railway lines and improving existing ones often justified by the reduction of fuel consumption and emissions of the whole transport system. It should therefore be taken into account in the design of necessary conditions to achieve this objective. And to achieve this is necessary, first, reduce its consumption, but also (and especially) make it attractive in terms of average speed to be able to attract travelers from other transport modes, especially aircraft and automobile. In this sense, in opinion of the author, only a small part of the energy savings and emissions attributable to the high speed train comes from the fact that it consumes less energy than the conventional train (due to the difference of tracks). Most of the energy savings comes from the high speed train (thanks precisely to the lure that gives it its speed) is able to capture many of passengers from the aircraft and private cars.*

*keywords: energy consumption, railway line drawing, energy saving and energy efficiency, speed.*

\* [albertogarcia@ffe.es](mailto:albertogarcia@ffe.es)

## **1. Introducción.**

No es preciso insistir en la importancia que tiene, en el momento actual, la reducción del consumo de energía y de las emisiones en todos los sectores, pero especialmente en el del transporte, que además de ser el sector mayor consumidor de energía en España, es el que tiene más alto ritmo de crecimiento y mayor dependencia del petróleo (y, por ello, de las importaciones del exterior).

El ferrocarril es, en ciertas condiciones, el modo de transporte que menos energía consume, debido fundamentalmente a la gran capacidad de los vehículos y a que claramente existe una relación inversa entre el tamaño del vehículo y el consumo específico por unidad transportada: vehículos más grandes permiten menores consumos por viajero o por tonelada transportada.

Por ello, el fuerte apoyo que el ferrocarril está recibiendo en todos los países del ámbito europeo y especialmente en España (que se concreta en la construcción de nuevas infraestructuras), se explica y justifica en un intento de contribuir con estas inversiones a reducir los costes totales del transporte, y singularmente los costes energéticos y ambientales. En definitiva, se invierte en el ferrocarril para que se puedan reducir el consumo de energía en general y de petróleo en particular, así como las emisiones de gases de efecto invernadero.

Esto hace que resulte de la máxima importancia lograr que el ferrocarril consuma poca energía. Pero esto no es suficiente: el servicio del ferrocarril ha de ser atractivo en términos de velocidad media, confort y frecuencia para que sea capaz de atraer viajeros de otros modos de transporte menos eficientes energéticamente: singularmente del avión y del coche particular. De poco serviría un tren muy eficiente energéticamente pero que, por ser poco atractivo en términos de lentitud, falta de frecuencia e incomodidad (y además caro), transportase pocos viajeros y que éstos siguieran viajando en el avión o en coche. Por lo tanto, en el diseño de los trazados conviene no olvidar las condiciones necesarias para que el tren consuma poca energía, pero también las que requiere para que resulte atractivo en términos de velocidad, frecuencia/capacidad y coste operativo y así pueda captar viajeros que empleaban otros modos de transporte menos eficientes energéticamente.

No se trata en este documento, desde luego, de sugerir que deba anteponerse la optimización energética a otros criterios que hay que tener en cuenta para el diseño del trazado. Tan solo se pretende poner de relieve cuáles son los factores de éxito que pueden conducir a lograr un trazado energéticamente eficiente, para que sean aplicados cuando ello sea posible; o cuando no entren en contradicción con otros objetivos de mayor prioridad en el caso concreto de que se trate.

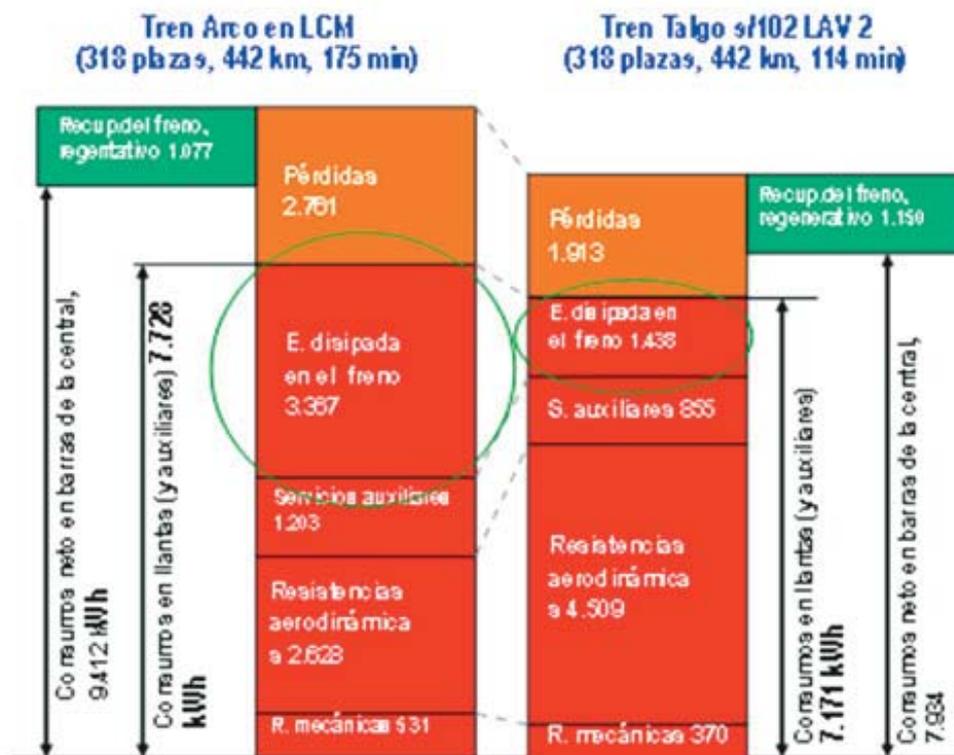
Seguidamente se analizan los puntos en los que se estima que el diseño del trazado puede contribuir a reducir el consumo de energía y las emisiones de los trenes en la fase de explotación posterior de la línea. Y también lo necesario para mantener y aumentar el atractivo comercial del ferrocarril.

## **2. Homogeneidad del perfil de velocidades**

La homogeneidad del perfil de las velocidades practicadas por los trenes a lo largo de su recorrido es uno de los factores que más inciden en su consumo de energía. Tan importante es este factor que (en parte gracias a él) se produce un hecho aparentemente paradójico, como es que el tren de alta velocidad (pese a la relación cuadrática de la velocidad instantánea con la resistencia aerodinámica) consume normalmente menos energía que el tren convencional. Entre las razones del menor consumo energético del tren de alta

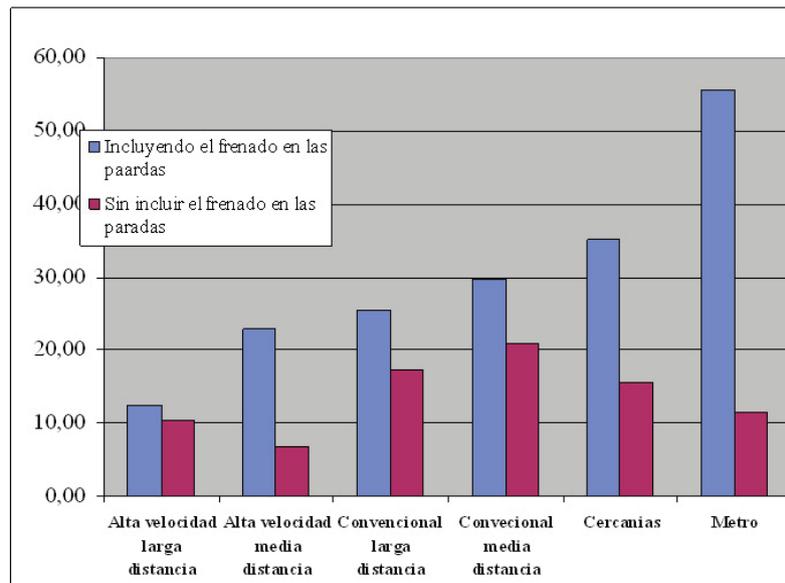
velocidad pueden citarse el menor tiempo de uso de los auxiliares (aire acondicionado), o características propias del tren (como su ligereza, menor rozamiento y mejor perfil aerodinámico), un mayor coeficiente de carga, etc... Pero el componente que más aportación en términos absolutos tiene es precisamente la menor necesidad de frenar para decelerar, no sólo en las paradas comerciales, sino en todo el trazado.

El autor ha publicado un artículo comparando el consumo de energía de un tren de alta velocidad en una línea de alta velocidad y con el de tren convencional en una línea mejorada para 200 km/h; en ambos casos con la misma distancia e idéntico número de paradas comerciales. Al analizar el detalle de las razones del menor consumo del primero, se muestra que la energía disipada en el freno de los trenes es un 58 % menor que en la línea convencional, lo cual por si solo permite compensar ampliamente el aumento de la energía empleada en vencer la mayor resistencia aerodinámica.



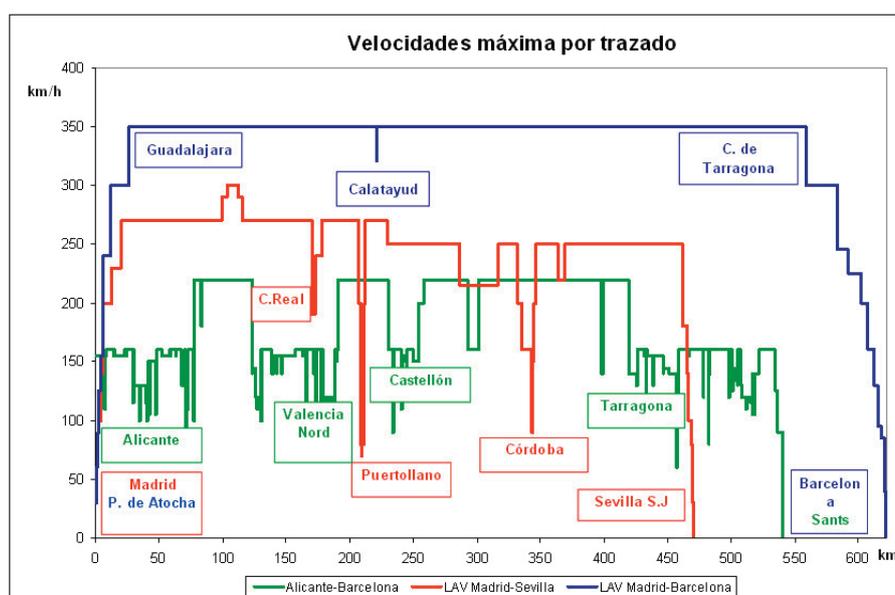
**Fig. 1.** Comparación del consumo desglosado de un tren de alta velocidad (derecha) con un tren convencional (izquierda). Se ha señalado la energía disipada en el freno por las variaciones de la velocidad. Fuente: García Álvarez (2005)

La energía disipada en el freno de los trenes representa entre un 12 % (alta velocidad) y el 56 % (Metro) de la energía importada en el pantógrafo de un tren<sup>1</sup>. Si se descuenta el efecto de paradas comerciales y del frenado en las pendientes, resulta que la energía perdida en el frenado de los trenes por limitaciones de velocidad oscila entre el 6,83% (tren de alta velocidad media distancia) y el 20,92% (tren de media distancia convencional).



**Fig. 2.** Porcentaje de energía perdida en el freno (sobre la energía importada en el pantógrafo) según el tipo de servicio. Elaboración propia con el simulador ALPI2810®

En España, en el año 2007 la cantidad de energía disipada por el freno de los trenes eléctricos (incluyendo ferrocarriles convencionales, Metros y tranvías) fue de alrededor de 1.282 GWh [4], lo que representa el 39% de la energía importada en el pantógrafo. Puede estimarse que, de ellos, alrededor de 427 GWh hora al año (el 13% del total) se disipa al frenar los trenes en reducciones de velocidad no debidas a las paradas comerciales. Esta cantidad de energía es aproximadamente equivalente al consumo de 106.000 hogares españoles, y cuatro veces más de la energía generada por todas las plantas fotovoltaicas en España en 2006, que fue de 104 GWh [2].



**Fig. 3.** Perfil de velocidades máximas por trazado en diversas líneas ferroviarias españolas. El perfil de la línea de Alicante a Barcelona tiene para un tren sin paradas comerciales el mismo efecto energético que si tuviera una parada cada 17 kilómetros; el de Madrid a Sevilla cada 120 km y el de Madrid a Barcelona cada 550 km

Una parte de esta pérdida de energía se reduce cuando se utiliza el freno regenerativo. Actualmente en España se recupera cerca de la mitad de la energía generada en el freno eléctrico de los trenes. Aún cuando, afortunadamente, se está ampliando mucho el uso de este tipo de freno y la eficiencia de la recuperación, resulta imposible aprovechar la totalidad de esta energía. En un escenario optimista, en el que todos los trenes eléctricos tuvieran freno regenerativo, existieran subestaciones reversibles y sistemas de almacenamiento de energía, el aprovechamiento de la energía del freno podría llegar hasta el 80% en el caso de la tracción eléctrica, siendo de difícil la recuperación en la tracción diesel ya que solo podría realizarse en acumuladores embarcados (baterías) y en cantidades relativamente pequeñas.

### **3. Evitación de limitaciones puntuales relevantes de velocidad**

Otra medida de diseño del trazado que reduce el consumo es evitar limitaciones puntuales relevantes de velocidad, entendiendo por tales aquellas que suponen reducción a valores absolutos muy bajos (inferiores a 50 km/h) o reducciones bruscas de la velocidad comparadas con aquella a la que el tren venía circulando antes de llegar a la limitación (por ejemplo, de un porcentaje de reducción mayor que el 50% de la velocidad previa del tren).

Estas limitaciones pueden tener su origen en el propio trazado y en otras ocasiones en la velocidad de paso por la posición desviada de los aparatos de vía, lo que suele aflorar cuando éstos están situados a cierta distancia de la estación o del punto de parada.

Las limitaciones de velocidad de este tipo tienen un efecto potencial serio sobre las velocidades medias. Si se desea mantener el mismo tiempo de viaje (lo que, por ejemplo puede ser necesario para que en una ruta concreta el tren pueda competir con el avión o con el coche particular), su efecto en el consumo puede analizarse en dos casos diferentes:

Si se desea mantener el mismo tiempo de viaje con una limitación puntual, es necesario reducir la longitud del recorrido que el tren circula en deriva, y por ello aumenta el consumo de energía. En el AVE de Madrid a Sevilla, los estudios para la implantación de la conducción económica en trenes sin freno regenerativo mostraron que circular en deriva en un 6% del tiempo de viaje suponía reducciones de consumo del orden del 8%. Una limitación temporal de velocidad a 120 km/h en una rampa de 12 mm/m que estuvo vigente durante tres meses en el año 1996 y que suponía una pérdida de 2,5 minutos, originó en esos meses un aumento del 3% del consumo de energía en toda la línea, no tanto por la energía perdida al frenar para cumplimentar la limitación, sino sobre todo porque reducía la posibilidad de realizar conducción económica.

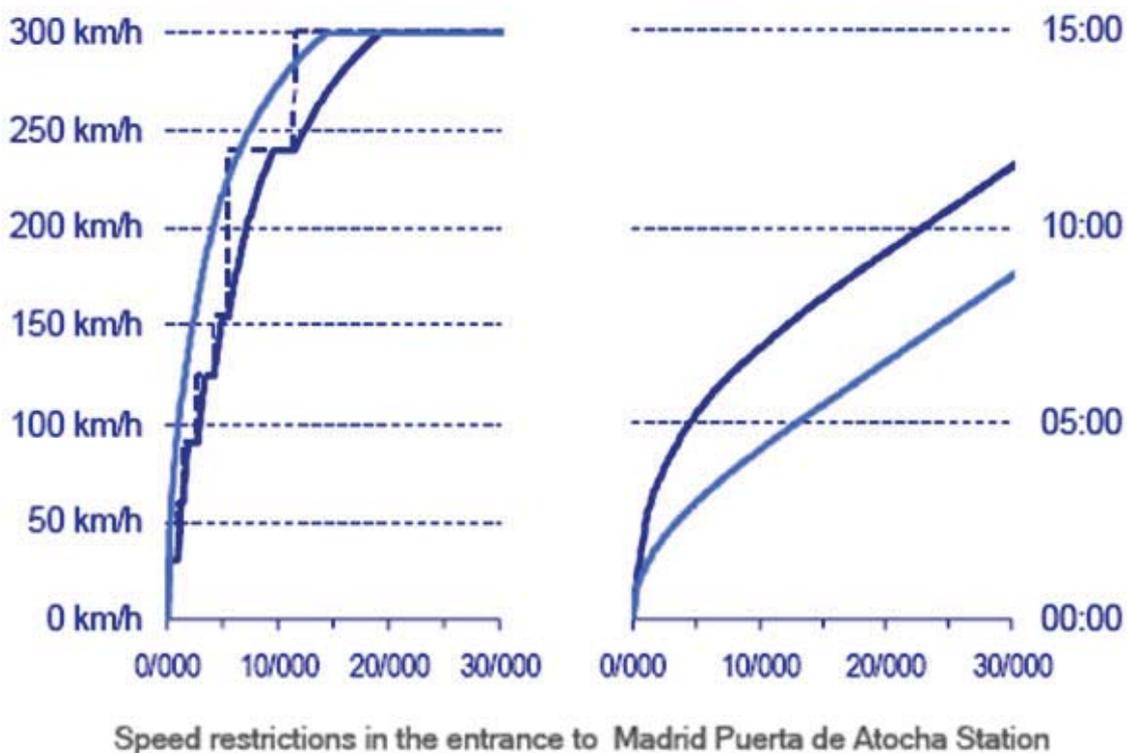
En el caso de las líneas con freno regenerativo, la “marcha en deriva” no es una forma eficiente de ahorrar energía; y además hay casos (con cualquier tipo de freno) en los que la exigencia de un tiempo de viaje ajustado no permite la “marcha en deriva” (por ejemplo, ocurre en las cercanías en hora punta). En estos casos, será necesario elevar las velocidades máximas en otros puntos del trazado para conseguir el mismo tiempo de viaje. Ello provoca, a su vez, un mayor consumo de energía por la mayor velocidad máxima, por la mayor heterogeneidad del perfil de velocidades y por el aumento de la desviación típica de la velocidad media (lo que provoca un aumento del consumo debido a la forma cuadrática de su función). Esta elevación de las velocidades máximas requiere normalmente inversiones mayores que las necesarias para eliminar la limitación de velocidad objeto del problema.

Cuando no sea posible reducir la “marcha en deriva” (por ejemplo porque no existan tramos en que se circule en deriva) o aumentar la velocidad máxima, la existencia de una limitación puntual aumenta el tiempo de viaje, y el tren puede perder atractivo frente a otros modos y puede tener menos viajeros, aumentando así el consumo de energía y las emisiones en el conjunto del sistema de transporte. En ese

sentido no deben despreciarse incrementos aparentemente pequeños del tiempo de viaje, porque en muchos casos (especialmente cuando se compite con el avión en el rango entre las dos y las tres horas, o cuando se compite con el coche en distancias cortas), el número de viajeros captados por cada minuto reducido es relevante. En el caso de la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona, cada minuto ganado supone quitar al avión 8.350 viajeros al año, y en consecuencia, evitar la emisión anual de casi medio millón de kilogramos de dióxido de carbono.

López Sánchez [7] ha recordado que es muy difícil recuperar en plena vía los tiempos perdidos en las estaciones y pone el ejemplo de que una limitación a 30 km/h tan solo en los 500 metros siguientes al andén puede suponer una pérdida de hasta 2 minutos, y que es necesario elevar la velocidad de 300 a 320 km/h a lo largo de 80 kilómetros para ganar solo un minuto.

Todo ello pone de relieve la necesidad de evitar al máximo las limitaciones extravagantes de velocidad, especialmente las de valor absoluto muy bajo (que suponen grandes pérdidas de tiempo, mayor energía disipada en el freno y menor ahorro aerodinámico).



**Fig. 4.** Restricciones de velocidad en la entrada de la estación de Madrid Puerta de Atocha.  
Fuente: López Sánchez (2008)

#### 4. Elevación de la rasante en estaciones con paradas de muchos trenes.

En los tramos en los que un tren precisa decelerar, la existencia de una rampa en dicho tramo de deceleración supone una menor necesidad de usar el freno, y por lo tanto, una menor disipación de energía (además de un menor desgaste del material rodante por evitarse el uso de los frenos de fricción).

Ello significa que existen ventajas energéticas cuando la estación está situada en una cota relativamente más alta que los tramos colaterales. En tal caso, cuando el tren se aproxima a la estación por cualquiera de los dos lados, encuentra una subida (rampa) cuando debe decelerar, lo que ayuda a reducir el uso del freno. Cuando el tren sale de la estación debe acelerar, y en este caso encuentra siempre una bajada (pendiente), lo que reduce la necesidad de potencia.

Esto es especialmente importante en las estaciones de cercanías o en aquellas en las que el porcentaje de trenes con parada sea elevado frente al porcentaje total de los trenes que circulan. A los trenes que circulan sin parada esta medida no les supone perjuicio ninguno, salvo que el valor de la rampa sea superior a un determinado valor que es conveniente evitar que se rebase.

Esta configuración es especialmente apropiada y favorable para estaciones subterráneas, porque además se reduce la altura a salvar por ascensores y escaleras mecánicas. Véase sobre este tema el trabajo de Clemente López.

El valor de inclinación tiene relación con la deceleración o aceleración que se desea conseguir: cuando el tren sube una rampa de valor  $i$  mm/m, la fuerza gravitatoria (en daN) que se opone a su marcha tiene por valor  $M$  (en t)  $\times i$  (mm/m) y la resistencia al avance tiene valores del orden de 2 a 3 daN/t.



**Fig. 5.** Maqueta de la nueva Noord/Zuidlijn Lijn del Metro de Ámsterdam, en la que se puede apreciar cómo las estaciones están en una cota más alta que los tramos colaterales.

Por ello, la fuerza total retardadora es, aproximadamente, de  $(1+2,5) \times 9,81 \text{ N/t}$  y la deceleración que supone es de  $(1+2,5) \times 9,81/1000 \text{ m/s}^2$ .

Si se deseara, por ejemplo, una deceleración de  $1 \text{ m/s}^2$  (que es un valor alto como deceleración de servicio, adecuado para un servicio de Metro o cercanías) se precisaría una rampa de  $99 \text{ mm/m}$ , a todas luces excesiva para las posibilidades del ferrocarril. Si se adoptan inclinaciones menores, también será menor la deceleración, y por ello el tren perderá más tiempo en el proceso de deceleración; o, si se desea emplear el mismo tiempo, necesitará el apoyo del freno.

Debe retenerse la idea de que la parte de deceleración que se consiga con la rampa evita el uso del freno en esa parte. En los trenes que carezcan de freno regenerativo, o en los que teniendo freno regenerativo no puedan aprovechar toda la energía del frenado, la ventaja es mayor.

También debe tenerse en cuenta que las señales de entrada a las estaciones no deben estar en rampas excesivas (ya que los trenes se detienen con frecuencia a ante ellas), y que los escapes situados a la entrada de la estaciones deben estar en rasante constante. Como la señal de entrada debe estar delante de los escapes de la entrada de la estación, una buena solución puede ser iniciar el acuerdo vertical justamente después de la señal de entrada, a fin de que la zona de rampa de valor constante coincida con la zona de escapes, y terminada ésta, comience el acuerdo vertical para finalizar la zona en rampa.

Una vez fijado el valor de la rampa, su longitud (en el caso de pudiera escogerse) depende de la velocidad de entrada a la rampa. La ecuación correspondiente es

$$V_f^2 - V_i^2 = 2 \times a \times l$$

de donde se deduce, por ejemplo, que con una deceleración de  $a = -0,4 \text{ m/s}^2$ , y siendo la velocidad de entrada al andén de  $15 \text{ km/h}$ , y la velocidad a la que inicia la subida de la rampa de  $80 \text{ km/h}$ , la longitud de la rampa debe ser de  $596 \text{ metros}$  y la diferencia de cota de  $23 \text{ metros}$ .

En la tabla se figuran (para diferentes rampas y declaraciones) la energía ahorrada en una estación en la que paran  $200$  trenes de  $250$  toneladas cada uno por sentido y día. Se compara la energía con el número de hogares que consumen esa energía en un día, así como las emisiones de gases de efecto invernadero necesarias para producir la energía eléctrica cuyo uso se evita, expresando éstas en el recorrido (en  $\text{km}$ ) en que un automóvil produce el mismo nivel de emisiones. Todos los resultados están calculados para dos casos: a) cuando no hay freno regenerativo, y B) cuando lo hay se aprovecha el  $50\%$  de la energía regenerada.

Como puede observarse, para un línea de Metro en la que se admita una rampa de  $38 \text{ mm/m}$  (correspondiente a una deceleración de  $0,4 \text{ m/s}^2$ ) y suponiendo una velocidad inicial de  $80 \text{ km/h}$  y una velocidad final  $15 \text{ km/h}$ , la energía ahorrada en una estación equivale a  $759$  hogares si no hay freno regenerativo o a  $304$  hogares contando con el freno regenerativo. Las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas cada día equivalen a las producidas por un automóvil medio circulando  $9.749$  kilómetros y  $3.900$  kilómetros respectivamente.

En una línea de cercanías, con una rampa máxima de  $28 \text{ mm/m}$  y velocidad inicial de  $100 \text{ km/h}$  y velocidad de entrada al andén de  $30 \text{ km/h}$ , el ahorro de energía diario equivale al consumo de  $1.118$  y  $447$  hogares (con y sin freno regenerativo) y las emisiones evitadas en un día equivalente a las producidas por la circulación de un coche en  $14.467 \text{ km}$  y  $5.747 \text{ km}$  respectivamente.

Ahorro de energía y emisiones por situar una estación en cota más alta que los tramos colaterales										Sin freno regenerativo		Con aprovechamiento del 30% de freno regenerativo	
Velocidad inicial en acceso a rampa (km/h)	Velocidad del tren en final rampa (km/h)	Deceleración en la rampa (m/s <sup>2</sup> )	Inclinación aproximada de la rampa (m/m)	Tiempo en la rampa (s)	Longitud de la rampa (m)	Diferencia de cota (m)	Energía no disipada en el freno por un tren (kWh)	Nº de hogares con consumo equivalente a energía ahorrada por 200 trenes al día por sentido	Kilómetros a recorrer con un coche para producir la emisión de CO <sub>2</sub> evitados en un día	Nº de hogares con consumo equivalente a energía ahorrada por 200 trenes al día por sentido	Kilómetros a recorrer con un coche para producir la emisión de CO <sub>2</sub> evitados en un día		
80	0	0,4	38,27	200	617	24	21,43	787	10.104	315	4.042		
100	0	0,4	38,27	260	965	37	33,49	1.229	15.788	492	6.315		
160	0	0,4	38,27	400	2.459	95	85,73	3.146	40.417	1.258	16.167		
<b>80</b>	<b>15</b>	<b>0,4</b>	<b>38,27</b>	<b>163</b>	<b>596</b>	<b>23</b>	<b>20,68</b>	<b>759</b>	<b>9.749</b>	<b>304</b>	<b>3.900</b>		
100	15	0,4	38,27	213	943	36	32,74	1.201	15.433	481	6.173		
160	15	0,4	38,27	363	2.447	94	84,98	3.119	40.062	1.247	16.025		
80	30	0,4	38,27	125	530	20	18,42	676	8.683	270	3.473		
100	30	0,4	38,27	175	878	34	30,48	1.118	14.367	447	5.747		
160	30	0,4	38,27	325	2.362	91	82,72	3.036	38.996	1.214	15.599		
80	0	0,3	28,08	267	823	23	21,43	787	10.104	315	4.042		
100	0	0,3	28,08	333	1.286	36	33,49	1.229	15.788	492	6.315		
160	0	0,3	28,08	533	3.282	92	85,73	3.146	40.417	1.258	16.167		
80	15	0,3	28,08	217	794	22	20,68	759	9.749	304	3.900		
100	15	0,3	28,08	263	1.257	36	32,74	1.201	15.433	481	6.173		
160	15	0,3	28,08	463	3.263	92	84,98	3.119	40.062	1.247	16.025		
80	30	0,3	28,08	167	707	20	18,42	676	8.683	270	3.473		
<b>100</b>	<b>30</b>	<b>0,3</b>	<b>28,08</b>	<b>233</b>	<b>1.170</b>	<b>33</b>	<b>30,48</b>	<b>1.118</b>	<b>14.367</b>	<b>447</b>	<b>5.747</b>		
160	30	0,3	28,08	433	3.176	89	82,72	3.036	38.996	1.214	15.599		

Hipótesis:	Valor	Unidad
Rendimiento total en tracción y freno regenerativo	0,8	kWh/kilómetros / kWh/kilómetros central generadora, o kWh/aprovechados / kWh regenerados/kilómetro
Consumo hogar medio	10,9	kWh / día
Emisiones generación de electricidad España 2010	330	grCO <sub>2</sub> / kWh
Emisiones producidas por un coche	140	grCO <sub>2</sub> / km
Masa del tren	250	toneladas
Número de trenes por sentido y día con parada	200	trenes

Tabla 1. Ahorro de energía y emisiones por situar una estación en cota más alta que los tramos colaterales

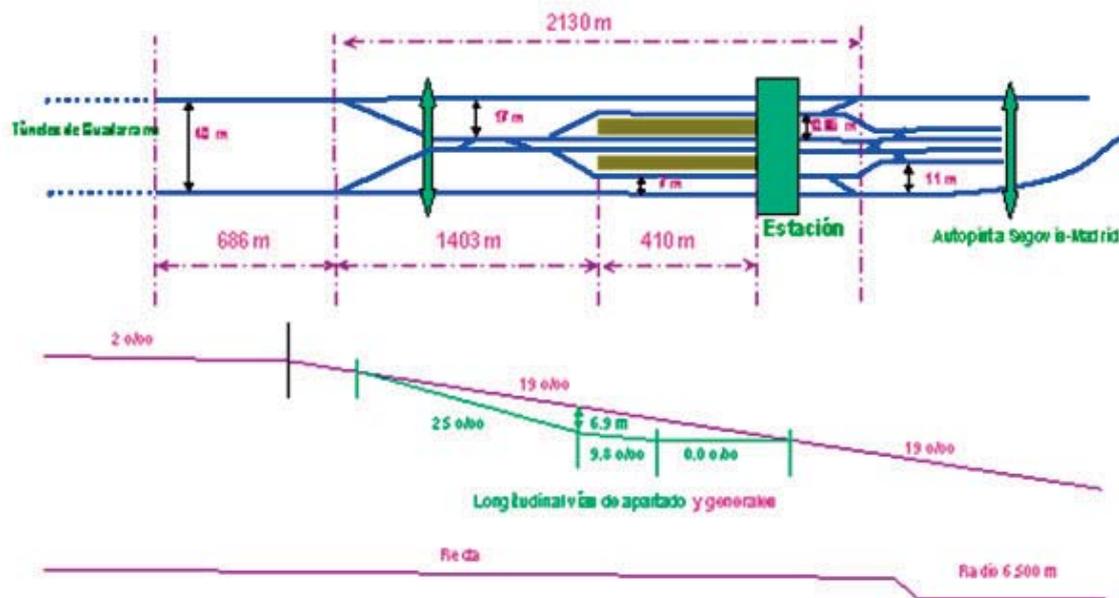
## 5. Trazado de línea en las zonas de parada y de estacionamiento.

En las zonas en las que es frecuente la parada de trenes (por ejemplo, en las zonas de andén en las estaciones) es conveniente que la rasante sea horizontal, evitándose con ello rampas en el sentido de arranque del tren. Desde el punto de vista de la energía, el perfil de la zona de estacionamiento no tiene influencia (puesto que el consumo dependerá del perfil de la zona de deceleración previa a la parada), pero la aceleración en horizontal o en suave pendiente reduce la potencia necesaria en el arranque, y por ello las pérdidas óhmicas en la catenaria, además de disminuir el tiempo necesario para el proceso de aceleración con la consiguiente ganancia de tiempo inducida por este concepto.

En el caso de que el trazado en la zona en la que se ubica una estación tenga una rampa fuerte y continuada puede estudiarse la posibilidad de trazar con diferente perfil las vías generales y las de apartado, manteniendo una zona aproximadamente horizontal en estas últimas, como se ha hecho por ejemplo en los casos de las estaciones de alta velocidad de Segovia-Guiomar y Puente Genil-Herrera.

## 6. Pendientes armonizadas con la velocidad.

Para la reducción del consumo de energía resulta conveniente adecuar el valor de las pendientes con las velocidades máximas que se admiten en las zonas de dichas pendientes, porque la combinación local de una pendiente fuerte (mayor que la "pendiente de equilibrio") con una velocidad admitida reducida (lo que es frecuente por las curvas existentes en estas zonas), puede obligar al tren a frenar para no rebasar la velocidad admisible, perdiendo así energía.



**Fig. 6.** Planta y perfil de la estación de alta velocidad de Segovia-Guiomar.  
 Fuente: GIF (2001)

Para cada velocidad admisible (por el trazado o por el material) en la zona de pendiente se puede calcular la “pendiente de equilibrio” ( $p_e$ ), que sería aquella con la que, a dicha velocidad, se igualan la componente aceleradora de la fuerza gravitatoria y la resistencia al avance. Se calcula con la fórmula:

$$p_e = a + b \times V_{\max} + c \times T_f \times V_{\max}^2$$

(en la que  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los coeficientes específicos de la resistencia al avance y  $T_f$  es el factor de túnel). En ella se observa que, cuanto mayor sea la velocidad máxima admisible, mayor será la pendiente de equilibrio.

Si la pendiente real ( $p_r$ ) es mayor que la pendiente de equilibrio, hay una parte de la energía potencial que debe ser disipada con el freno con la consiguiente pérdida de energía, concretamente esa parte es:

$$\text{Energía perdida en el freno} = M \times g \times (p_r - p_e) \times L$$

Como puede observarse, esta pérdida de energía es menor cuanto mayor sea  $p_e$ ; y por ello, la pérdida de energía es menor cuanto mayor sea  $V_{\max}$ .

Como por otra parte, en la mayor parte de las líneas ferroviarias se circula indistintamente en los dos sentidos, esta reflexión es válida en todos los puntos de la línea, siendo la recomendación general adaptar el valor de las inclinaciones de la rasante a la velocidad permitida por el trazado en el tramo correspondiente (o ésta adaptarse a aquéllas), al objeto de los valores de la pendiente real no superen el de la pendiente de equilibrio.



**Fig. 7.** En las pendientes fuertes el tren pierde energía al frenar para no rebasar la velocidad máxima. Los 25 mm/m de la LAV de Madrid a Barcelona penalizan el consumo de los trenes que van a menos de 235 km/h (Foto AGA)

En este aspecto merece ser destacado lo eficiente del trazado (desde este punto de vista) en la línea de alta velocidad de Madrid a Sevilla, en la que las pendientes reales máximas (12 mm/m) casi coinciden con el valor de la pendiente de equilibrio para la velocidad máxima (300 km/h) y para los coeficientes *a*, *b* y *c* del tren AVE de la serie 100. Ello significa que si el tren circula a 300 km/h nunca debe hacer uso del freno para evitar el rebase de la velocidad por efecto de la pendiente.

En el caso de la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona, con pendientes máximas de 25 mm/m, los trenes deben emplear con frecuencia el freno para evitar el exceso de velocidad en las pendientes. Por ejemplo, un tren AVE serie 103, circulando a 300 km/h de velocidad máxima, pierde 1.260 kWh (el 11% de la energía importada en pantógrafo) por el freno en las pendientes (sin perjuicio de que una parte de esta energía se pueda recuperar gracias al freno regenerativo). El mismo tren circulando a 350 km/h sólo pierde 392 kWh (alrededor del 3% de la energía importada en el pantógrafo). Se da la paradoja que de si el tren puede circular a una velocidad mayor en las pendientes, además de tener menos tiempo de viaje, consume menos energía.

La posibilidad de reducir el consumo de energía evitando el uso del freno en las pendientes fue la razón por la que, en los años 80, se elevó la velocidad de circulación en la línea de alta velocidad de París a Lyon (en la que son muy frecuentes las rampas y pendientes de 35 milímetros por metro) desde los 260 km/h con que comenzó la explotación a 270 km/h. Con esta elevación de velocidad máxima se logró una reducción del consumo de energía compatible con un tiempo de viaje más reducido. En la línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona cuando el 7 de mayo de 2007 se elevó la velocidad máxima en el tramo de Madrid a Camp de Tarragona desde los 280 km/h a los 300 km/h, se produjo una reducción del consumo de energía de los trenes del orden del 3% a pesar de que se introdujo una reducción simultánea de los tiempos de viaje.

## **Referencias bibliográficas**

CLEMENTE LÁZARO, I. (2005): “Reducción del consumo energético por elevación relativa en la cota de altura de la estaciones ferroviarias”. Proyecto de Fin del Master de Sistemas Ferroviarios ICAI curso 2003-2004.

COMISIÓN NACIONAL DE LA ENERGÍA (2008): “Información básica de los sectores de la energía 2007”.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2005): “El tren de alta velocidad no es un depredador de energía”, en *Dyna*, junio 2005, LXXX-5, pág. 33 a 38; edición actualizada en mayo de 2007.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2008a): “Inventario de consumos de energía del ferrocarril en España”, Nota Técnicas ElecRail/1, versión 4.0. de 8 de octubre de 2008.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2008b): “Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad” en “La importancia de la velocidad en el ferrocarril”; Ed.: Fundación Caminos de Hierro, Córdoba, 2008.

GESTOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS (GIF), DIRECCIÓN DE EXPLOTACIÓN (2001). “Estación de Segovia. Datos básicos para el proyecto de ejecución”.

LOPEZ SÁNCHEZ, C. (2008): “Basic principles for the operation of high speed lines and trains. The traffic control centre”, en “5 th Training on high speed systems”, París, junio de 2008.

## Desarrollo de un modelo de predicción de disconfort acústico en coches de vehículos de alta velocidad

### *Development of a prediction model of acoustic discomfort in high-speed train passenger cars*

Oriol Gibert\*<sup>a</sup>; Juan Sapena<sup>a</sup>; Begoña Mateo<sup>b</sup>; Nicolás Palomares<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Alstom Transport

<sup>b</sup> Instituto de Biomecánica de Valencia

#### Resumen

La percepción acústica es considerada uno de los factores de mayor importancia en la valoración del confort en vehículos de alta velocidad.

El presente estudio se enmarca en un proyecto de investigación desarrollado por ALSTOM Transport y el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) con el objetivo de generar un modelo de predicción del disconfort acústico del sonido interior de coches de pasajeros en vehículos de alta velocidad.a.

*Palabras clave: Calidad Sonora, Psicoacústica, Confort Acústico.*

#### Abstract

*Acoustic perception is considered as one of the most important factors in the comfort assessment in high-speed vehicles.*

*The present study is focused in a research project developed by ALSTOM Transport and the Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) with the objective of generate a prediction model of interior noise acoustic discomfort in high-speed train passenger cars.*

*keywords: Sound Quality, Psychoacoustics, Acoustic Comfort.*

\*[oriol.gibert-escofet@transport.alstom.com](mailto:oriol.gibert-escofet@transport.alstom.com)

## 1. Introducción

La percepción acústica del pasajero ha sido estudiada por numerosos autores en el ámbito de la calidad sonora ya que se considera uno de los factores de mayor importancia en la valoración del confort en un vehículo de alta velocidad. En el sector ferroviario, los operadores evalúan en la actualidad el confort acústico del pasajero a través del parámetro tradicional nivel de presión sonora ponderado en A. Sin embargo, estudios recientes apuntan que esta visión es insuficiente y podría mejorarse mediante la aplicación de la psicoacústica (estudio de la percepción humana de los sonidos).

Por este motivo surge la necesidad de desarrollar un proyecto de investigación con el objetivo de generar un modelo de predicción de discomfort acústico en vehículos ferroviarios de alta velocidad, utilizando parámetros psicoacústicos. El modelo estaría constituido mediante los parámetros sonoros obtenidos a partir de sonidos grabados en distintas áreas de pasajeros en el tren (caracterizando acústicamente todo el vehículo) y la evaluación subjetiva del confort acústico mediante ensayos con usuarios (jury test)

## 2. Desarrollo

### Plan de trabajo

El presente estudio ha consistido en el desarrollo de las tareas mostradas en la **Figura 1**. En primer lugar se llevó a cabo una revisión en detalle de los últimos avances en la interpretación de los parámetros psicoacústicos. Para caracterizar acústicamente el sonido en el interior del tren, se efectuaron registros sonoros en distintos vehículos de alta velocidad. Posteriormente, tras la validación del procedimiento de evaluación subjetiva de los sonidos mediante un ensayo piloto, se realizó el jury test con todos los sonidos obtenidos. Por último, mediante tratamiento estadístico, se estudió la relación entre los parámetros objetivos obtenidos y la evaluación subjetiva obtenida en el jury test. Con ello se validó la posibilidad de la obtención de un modelo de predicción que calcule el nivel de confort de los pasajeros a partir de parámetros psicoacústicos.



**Figura 1.** Etapas del estudio.

### Medidas en campo

Los sonidos fueron grabados en seis modelos de trenes de alta velocidad, de diferentes fabricantes de material rodante, recorriendo líneas de alta velocidad a velocidades comerciales. Para lograr caracterizar en conjunto el sonido del interior del vehículo, las mediciones se realizaron en distintas posiciones en cada coche y en coches específicos dentro de la composición que constituyen los trenes.

Con la finalidad de poder reproducir de una manera realista el sonido interior de los vehículos ferroviarios en laboratorio, las medidas de campo se realizaron con un equipo de HEAD Acoustics constituido por una cabeza artificial y un software de grabación asociado (**Figura 2**). Esta cabeza artificial se encuentra específicamente diseñada para la investigación de la calidad sonora, permitiendo la grabación de sonidos de forma binaural así como la escucha posterior de los sonidos grabados en un laboratorio. De esta manera, los participantes en el jury test no requieren estar presentes en los vehículos para tener una impresión acústica del sonido generado por los trenes.



**Figura 2.** Cabeza artificial situada en el coche de pasajeros.

### Caracterización sonora

Para representar de forma objetiva los sonidos registrados, se obtuvo el parámetro tradicional nivel de presión sonora ponderado en A, y los siguientes parámetros psicoacústicos: loudness (intensidad sonora), sharpness (nitidez, agudeza), roughness (aspereza, rugosidad), fluctuation strength (fluctuación) y tonality (tonalidad). Los parámetros fueron calculados mediante el programa Analysis System ArtemiS de HEAD Acoustics (**Figura 3**).

### Jury test

El equipo de reproducción consistía en un sistema de auriculares conectados a un ecualizador PEQ V de Head Acoustics. Este equipo se utilizó para reproducir con precisión grabaciones binaurales, haciendo posible que los oyentes tuvieran una impresión acústica realista similar a la que obtendrían si estuvieran dentro del tren.

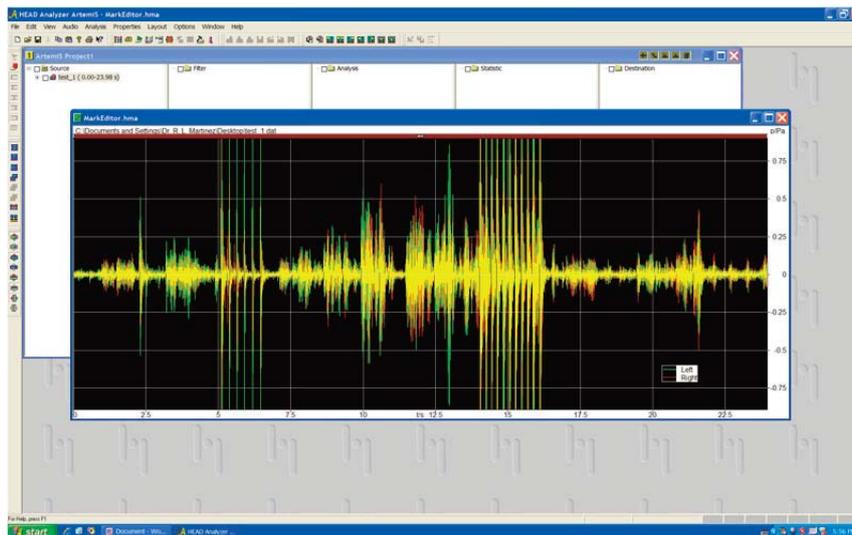


Figura 3. Cálculo de los principales parámetros psicoacústicos.

El procedimiento, establecido previamente en un ensayo piloto, se basaba en la evaluación de los sonidos por parte de usuarios frecuentes de vehículos ferroviarios. La evaluación de molestias consistía en la valoración de los sonidos en una escala continua desde 0=no molesto a 10=muy molesto, utilizando como ayuda sonidos de referencia en los extremos de la escala (sonidos extremos del parámetro loudness).

Utilizando una pizarra magnética e imanes de identificación (marcadores) de cada sonido a evaluar, los participantes los clasificaron en una escala de molestias (Figura 4).

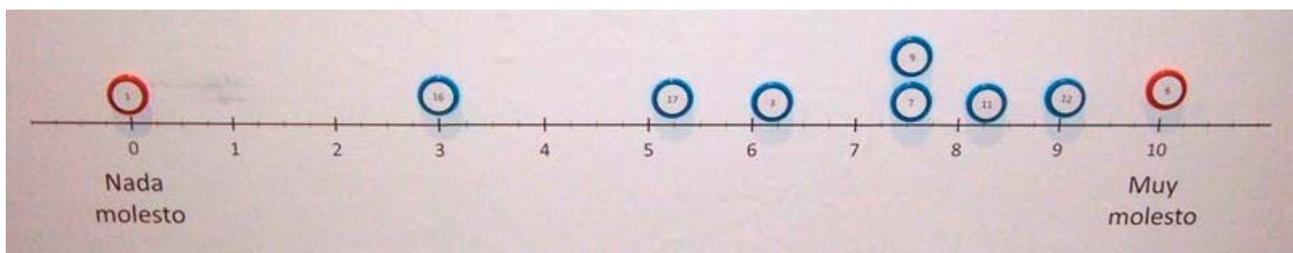


Figura 4. Evaluación de sonidos en una pizarra magnética.

Los participantes del estudio realizaron los ensayos en una sala silenciosa para no ser molestados por otros sonidos externos. Los sujetos se sentaron en una butaca de un vehículo de alta velocidad para simular la percepción de estar viajando en un tren, recreando una atmósfera similar al lugar donde se registraron las grabaciones (Figura 5).

Para el jury test se grabaron un total de 50 sonidos, efectuándose ocho valoraciones para cada uno de los sonidos. Por tanto, el jury test permitió obtener 400 evaluaciones subjetivas de sonidos de tren.



Figura 5. Participantes durante una sesión.

### 3. Resultados

El objetivo del modelo fue la predicción de la valoración de molestia de cada sonido utilizando los parámetros psicoacústicos como predictores. Estos predictores potenciales fueron los percentiles 5, 50, 95 y los rangos (percentil 95 - percentil 5) del nivel de presión sonora ponderado en A, loudness, sharpness y roughness (los parámetros fluctuation strength y tonality fueron excluidos por la ausencia de valores relevantes). La variable resultado fue el valor medio de la evaluación sonora obtenida en los jury tests. Después de una exploración de los datos, se seleccionó como más adecuada la técnica de regresión múltiple para calcular el modelo.

El modelo obtenido utiliza como variables predictoras el parámetro nivel de presión ponderado en A (percentil 95) y el parámetro sharpness (percentil 5). El modelo obtenido utilizando los parámetros psicoacústicos presenta un alto ajuste ( $0.90 R^2$  ajustado), incrementando 25% la predicción del nivel de molestia en caso de que se hubieran utilizado únicamente parámetros acústicos tradicionales ( $0.65 R^2$  ajustado). Esta mejora puede observarse en la **Figura 6** donde se muestra el modelo obtenido con la inclusión de los parámetros psicoacústicos (izquierda) y el modelo predicho a partir de modelos acústicos tradicionales (derecha).

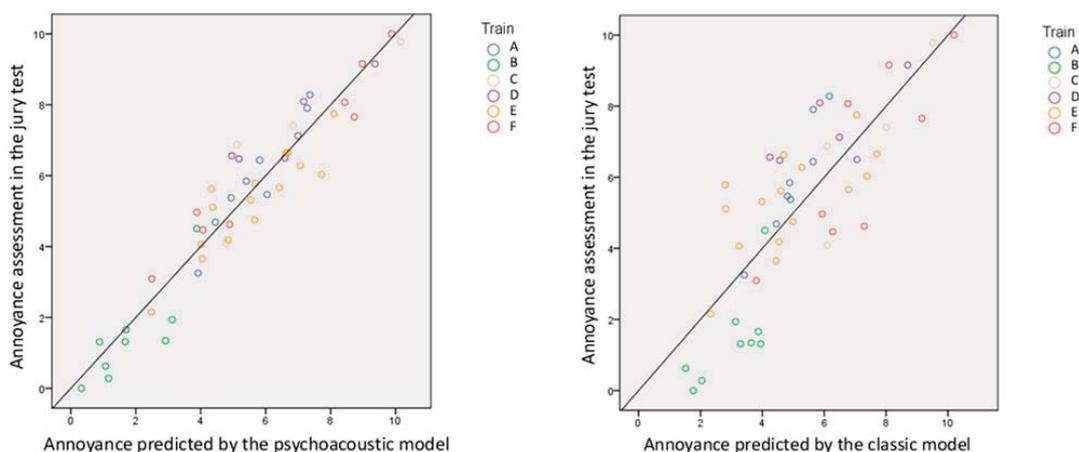


Figura 6. Comparación del modelo con parámetros psicoacústicos (izquierda) y parámetros acústicos tradicionales (derecha).

#### **4. Conclusiones**

El modelo obtenido puede predecir con precisión el desconfort acústico en coches de vehículos de alta velocidad en condiciones reales. Los resultados indican el incremento de precisión del modelo cuando se incorporan los parámetros psicoacústicos a un modelo obtenido únicamente con parámetros acústicos tradicionales.

La mejora en las posibilidades de aplicación y realismo difiere de otros estudios principalmente en la variedad de trenes de alta velocidad utilizados, su completa caracterización por posiciones diferentes de medida dentro del tren y el realismo de las condiciones de medida. Todos los sonidos han sido grabados en sus velocidades comerciales respectivas sin alteraciones por medio de programas de edición de sonidos, siendo representativos del sonido que está sometido un pasajero en condiciones reales.

Este estudio permitirá a ALSTOM Transport aplicar los principales resultados en el diseño de futuro material rodante para garantizar un confort acústico óptimo en trenes de alta velocidad, considerándose un factor clave en la satisfacción de los pasajeros.

#### **5. Agradecimientos**

A RENFE OPERADORA que permitió el acceso al material rodante para la realización de las medidas en los vehículos.

## Tecnologías para el transporte urbano: los tranvías y metros ligeros

### *Technologies for urban transport: trams and light subways*

Oscar Martínez Álvaro

#### Resumen

La paulatina desaparición de los tranvías, a mediados de los años 60, no ha impedido que actualmente seamos testigos de un renacimiento. Entre todos los países es Francia quien lidera el impulso hacia la implantación de este medio de transporte. Optimizar el equilibrio entre las consecuentes ventajas e inconvenientes se presenta como fundamental para los gobiernos estatales. Aspectos económicos, medioambientales y de aprovechamiento se entremezclan en los obligatorios análisis que se deben llevar a cabo para hacer de este medio la mejor opción a la hora de desplazarnos.

*Palabras clave: tranvías, ventajas, inconvenientes, impacto visual, tecnologías, consumo energético, costes económicos, sistemas mixtos, evaluación.*

#### Abstract

*The gradual disappearance of the streetcars in the sixties has not prevented we are witnesses of a renaissance today. Beyond all countries, France leads the impulse towards the implantation of this way of transport. Optimizing the balance between the consistent advantages and disadvantages is the governments' main aim. Economic, environmental and utilization aspects intermingle in the obligatory analyses which must be carried out in order to this transport is the best to shift.*

*keywords: tramways, advantages, disadvantages, visual impact, technologies, energy consumption, economic costs, mixed systems, evaluation.*

## **1. Tendencias y ventajas del sistema tranviario**

El análisis de compatibilidad plataforma-vehículo, en función de los radios de curvatura, diferencia de cotas y distancias de separación, ponen de manifiesto la necesidad de eliminar barreras que de otro modo resultarían insalvables para una parte importante de usuarios del servicio ferroviario. El objetivo a perseguir es el acceso de usuarios a recursos y bienes en condiciones de equidad, y ello ha llevado en nuestro país tanto al administrador de la infraestructura (ADIF) como al operador (RENFE) a la implementación de ambiciosos planes de accesibilidad en sintonía con lo dispuesto en el marco normativo vigente a nivel Europeo.

Desde hace unos años se viene asistiendo a un proceso de implantación de sistemas tranviarios en España, que no es sino el reflejo de una tendencia muy similar en otros países. Aunque los tranvías desaparecieron de la mayoría de las ciudades europeas a mediados de los años 60 del siglo XX, en los últimos 25 años se ha venido asistiendo a un renovado interés por unos sistemas que presentan numerosas ventajas, de las que se suelen citar las siguientes:

Disponen de gran capacidad, fundamentalmente si prestan su servicio en plataforma reservada, que es cuando se suelen denominar “metros ligeros”.

Tienen un excelente rendimiento energético por vehículo – kilómetro, tanto por el uso de motores eléctricos muy eficientes, como por el empleo de rodadura metálica que consume menos energía que la rodadura neumática y por la recuperación de buena parte de la energía de frenado (que, en vez de disiparse en forma de calor como pasa con los sistemas clásicos de fricción, se reenvía a la red).

No emiten ningún tipo de gas en el lugar donde prestan el servicio gracias a su tracción eléctrica.

## **2 Francia como líder de crecimiento en la implantación**

Prácticamente en todos los países existen realizaciones o proyectos de implantación de tranvías y metros ligeros, sin embargo es Francia quien ha liderado el crecimiento. Por todo el mundo desarrollado son numerosas las ciudades, fundamentalmente de tamaño medio, que se han sumado a la corriente general.

Incluso es frecuente que las operaciones de implantación de estos sistemas hayan ido acompañadas de inversiones ingentes en procesos de renovación urbana. En ciudades como Nantes, Estrasburgo o Burdeos, la propia imagen de la ciudad se ha visto alterada de manera sustancial, con grandes peatonalizaciones que han sacado a los coches de la calle, ganando espacio para las personas. Además, los avances tecnológicos han permitido reducir algunos de los inconvenientes clásicos de los tranvías, como las catenarias: con un sobrecoste de cierta entidad, pero que no es proporcionalmente muy elevado, ya es posible implantar estos sistemas sin los cables aéreos de alimentación que tanto afeaban el escenario urbano.

Con todo ello, no es de extrañar que el tranvía (o el “metro ligero”) haya conseguido llegar a ser una de las ideas más arraigadas de renovación urbana en el imaginario popular. Y buenas razones tiene para ello. Pero parece conveniente una cierta puntualización desde la ciencia más que desde la intuición, desde los datos más que desde los lugares comunes.

Como Francia ha sido el país pionero en estos sistemas, puede ser útil un pequeño análisis de las ciudades donde se han implantado tranvías. No es fácil sintetizar las características de una ciudad y de su sistema de transporte, pues existen multitud de factores que exigen una evaluación comparada de difícil formalización, y menos en el contexto de un artículo como este: topología de la red viaria, estructura urbana de actividades, etc. Y mucho más difícil aun resulta determinar con precisión los aspectos financieros: compensaciones por obligaciones de servicio público, subvenciones de inversión, subvenciones de explotación, “versement transport”, etc.

En el ánimo de aportar alguna evidencia objetiva, existe un aspecto significativo y de relativamente fácil análisis: el volumen total de demanda. Aunque existen numerosos factores que podrían analizarse en un análisis profundo (estructura tarifaria, demanda en hora punta y valle, incidencia del número de trasbordos, existencia de “efecto red”, etc.), para una primera aproximación es ilustrativo comenzar con el número de pasajeros transportados.

En los gráficos 1 y 2 se pone de manifiesto que el volumen total de demanda por línea en los casos mayores en España se sitúa muy por debajo de los casos típicos en Francia. Salvo Barcelona y Tenerife, ningún caso español es comparable al menor francés (la línea de menor demanda del gráfico es la C de Burdeos, que forma parte de un sistema de tres líneas).

Pero podría ocurrir que este volumen de demanda estuviera distorsionado por la longitud de las respectivas líneas. Por ello, se han elaborado los gráficos 3 y 4 que proporcionan un indicador sintético: el número total de pasajeros en un día dividido por la longitud de la línea respectiva. Y con la información que proporcionan, la conclusión es de índole similar: la demanda relativa así medida, en los mayores casos españoles se sitúa en el entorno de los menores casos franceses.

### **3. El caso de España**

En España se ha optado por sistemas pequeños que transportan muy pocas personas. Luego, una de las ventajas preconizadas, la de la gran capacidad, estaría siendo desaprovechada. Todo apunta a que, en muchos casos, en España se ha optado por tecnologías de gran capacidad para situaciones en que no es necesaria.

Podría ocurrir que en estas aplicaciones no se estuviera obteniendo el máximo de una de las ventajas potenciales, pero el resto de ventajas verse plenamente explotadas. Es decir, que sí que se estuviera aprovechando la gran eficiencia de los sistemas tranviarios desde el punto de vista energético y ambiental. Sin embargo, sobre esto surgen también muchas dudas tras un análisis objetivo.

El consumo energético de un tranvía viene a ser del orden de la mitad de un autobús convencional de capacidad equivalente. Luego, si su ocupación es menos de la mitad de un autobús, su consumo por pasajero transportado es mayor. Por ello, se da la aparente paradoja de que el consumo energético de los sistemas tranviarios en servicios de baja ocupación es sustancialmente mayor por pasajero transportado que si se realizase con autobuses convencionales. Como es mucho mayor la capacidad de un tranvía que la de un autobús, y los usuarios exigen servicios frecuentes, la capacidad ofrecida por los tranvías es excesiva para muchos de los servicios en los que se está usando en España. Servicios con frecuencia de autobús, pero con capacidad varias veces mayor.

Y la contribución a la contaminación ambiental resulta también un elemento de reflexión. La capacidad ofrecida por los tranvías es excesiva para muchos de los servicios en los que se está usando en España. Pérdidas de energía por transporte desde la fuente de generación de electricidad y la composición de las energías renovables en la generación, en muchos casos españoles resulta que los tranvías emiten más CO<sub>2</sub> que si se prestase el servicio con autobuses.

Y a esto se deben añadir otros aspectos que a veces pasan desapercibidos:

Rigidez de sus trazados, que dificulta las modificaciones posteriores si cambian las circunstancias. Una vez implantado el recorrido es difícilmente ampliable y prácticamente imposible de modificar.

Gran coste de inversión y explotación. El coste típico de inversión puede alcanzar cifras de entre 15 y 20 millones de euros por kilómetro. Sólo en los casos de mayor demanda puede amortizarse la infraestructura en el largo plazo.

Dependencia de un proveedor. Una vez escogida una tecnología, la dependencia es absoluta: sólo hay un fabricante para cada sistema. Los sistemas son de “tecnología propietaria” y no hay alternativas.

Impacto estético. Aunque ya es posible eliminar las catenarias, el impacto visual de los propios tranvías es enorme. Con vehículos de 30 a 35 metros de longitud, es inevitable una intrusión visual de gran entidad.

Ante todo este panorama no es raro que no exista solamente una tecnología de “sistemas guiados de transporte urbano”. Además de los sistemas puramente tranviarios más o menos sofisticados (con o sin catenaria, por ejemplo) han aparecido sistemas mixtos, como el tranvía sobre neumáticos con guiado central de Translohr con una primera realización en Clermont-Ferrand en 2006, el sistema TVR en Nancy en 2000 y en Caen en 2002, el trolebús de guiado óptico Cavis en Lyon desde 2001, etc.

#### **4. La importancia de la planificación.**

Si se hubiese realizado una adecuada evaluación ex ante, muchos proyectos españoles de tranvía probablemente no habrían sido ejecutados. Con una evaluación ex post, lo que parece es que pueden ser socialmente útiles solamente los proyectos que conecten zonas de alta densidad de viviendas y grandes centros de actividad que atraen muchos desplazamientos.

Es tarea de las Autoridades de Transporte aplicar criterios de selección de inversiones que garanticen que los recursos públicos se orientan a proyectos que sean sostenibles económica, social y ambientalmente. Los tranvías deben estar donde se captan los grandes flujos de demanda. Y si eso va en detrimento del tráfico de algunas calles, habrá que establecer prioridades y decidir de manera coherente: lo que debe maximizarse es el uso de los recursos consumidos, no la tecnología. Si el vehículo privado consume decenas de veces más de recursos que el transporte colectivo (espacio para circular, espacio para estacionar, etc.), deberá actuarse en consecuencia, pero sin prejuzgar los resultados y evaluando todas las alternativas posibles.

Las tecnologías no son buenas o malas por sí mismas, sino por el uso que se hace de ellas. Una tecnología puede ser conceptualmente muy buena, pero mal empleada puede hacer mucho daño, y las tecnologías del transporte urbano no son ajenas a este razonamiento general: en unos casos la solución será el tranvía, en otros el metro convencional, en otros el autobús, en otros un sistema guiado mixto, etc. Todo dependerá de las circunstancias concretas. La aplicación ciega de recetas sin una evaluación razonada puede conducir a errores catastróficos que hipotequen el futuro de esas ciudades a las que se pretendía salvar.

## 5. Anexo. Gráficos.

La fuente originaria de todos los gráficos es: “Comparación del proceso de implantación de sistemas de transporte público de capacidad intermedia en Francia, Reino Unido, España e Italia. Pedro Barea y Oscar Martínez. Congreso de Ingeniería de los Transportes. Madrid. 2010”. En algunos casos se han realizado cálculos complementarios.

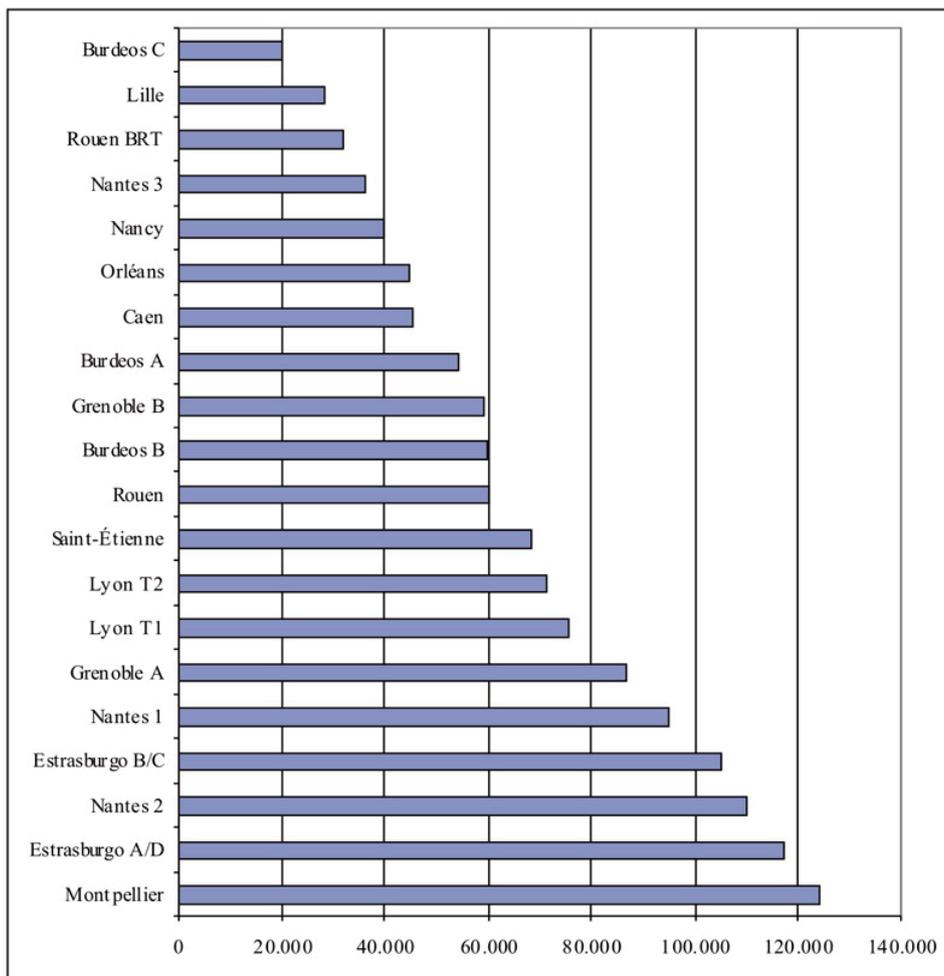
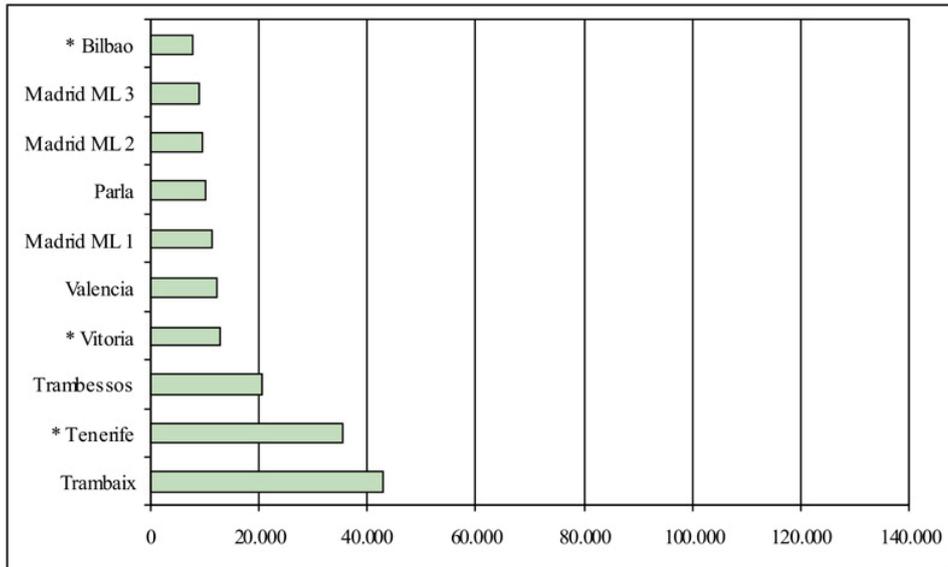
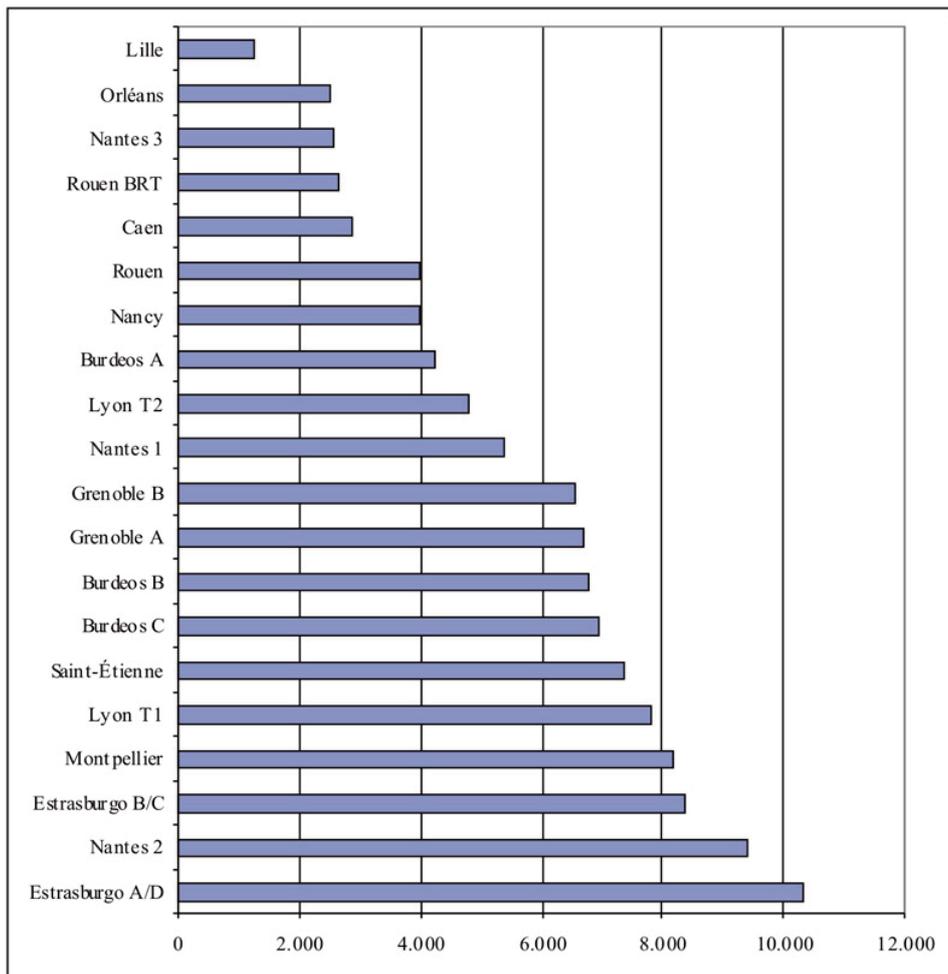


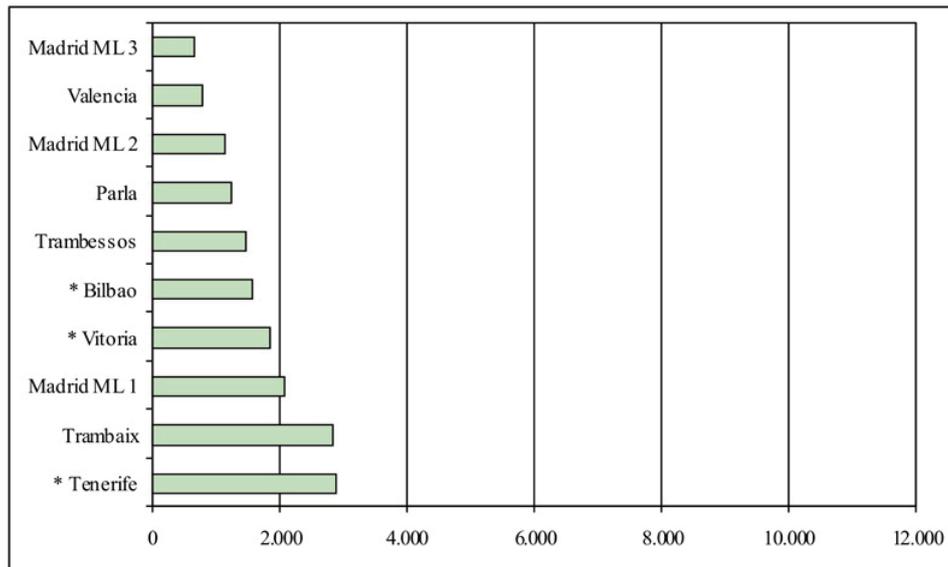
Gráfico 1. Pasajeros en día medio en diversas líneas en Francia.



**Gráfico 2.** Pasajeros en día medio en diversas líneas en España.



**Gráfico 3.** Pasajeros en día medio / kilómetro en diversas líneas en Francia.



**Gráfico 4.** Pasajeros en día medio / kilómetro en diversas líneas en España.



## Modelización de la interacción vía-tranvía

### *Modelization of the Track-Tramway Interaction*

Susana Anacleto Lupiáñez

#### Resumen

A pesar de su extendida implantación, todos los países que disponen de red de tranvía y/o metro ligero padecen la falta de normativas específicas para la construcción y mantenimiento de su superestructura. Esta realidad ha provocado prácticas como la adopción directa o la extrapolación de valores normativos de tolerancias geométricas aplicables a líneas de ferrocarril convencional, pero no existe una trasposición clara de esas tolerancias para el trazado de ferrocarriles urbanos.

Entre los principales objetivos de esta tesina destaca la propuesta de una metodología completa que permita, a partir de los registros de los defectos geométricos de una vía, acabar estimando valores adecuados de tolerancias geométricas. El criterio impuesto a estas tolerancias es la garantía de cierto nivel de confort en la marcha del vehículo. Y es precisamente la aplicación de criterios de confort al cálculo de tolerancias lo que se define como novedoso de este estudio, puesto que es tradicionalmente el criterio de la seguridad (riesgo de descarrilo) el que rige en la normativa en materia de calidad de vía.

*Palabras clave: ingeniería ferroviaria, geometría, vía, tranvía, interacción vía-vehículo, tolerancias geométricas, confort.*

#### Abstract

*In spite of tramway infrastructure's spread over the last few years, all the countries having a tramway or a light rail network suffer from lack of specific standards for the construction and the maintenance of their superstructure. This fact has lead to practices as the direct adoption or the extrapolation of geometric limit values from conventional railways, but it does not exists any clear criteria to justify the tolerances that are finally demanded to tramway constructors.*

*Among the main goals of this thesis, there is the definition of a methodology which allows to estimate appropriate limit values starting from a geometric track defect record. These geometric tolerances must be defined fulfilling the condition of guaranteeing certain level of vehicle ride comfort. The application of comfort criteria to the calculation of track defects' limit values is precisely the original piece of this study, since the criterion of security (risk of derailment) is the one which traditionally governs track quality standards.*

*keywords: railway engineering, geometry, track, tramway, track-tramway interaction, geometric tolerances, confort.*

## 1. Introducción. Ausencia de marco normativo específico para ferrocarriles urbanos ligeros.

La presencia de defectos en cualquiera de los parámetros geométricos de una vía atenta contra el confort e incluso la seguridad de la marcha del vehículo ferroviario. Existen diversas normativas para la regulación de los límites admisibles de cada tipo de defecto geométrico de una vía ferroviaria, que, sin embargo, son solamente aplicables a los casos de líneas convencionales y/o a líneas de alta velocidad, puesto que se basan en experiencias y estudios realizados sobre vehículos y superestructuras de ese tipo.

A pesar de su extendida implantación, los ferrocarriles urbanos ligeros (y, más concretamente, los tranvías) **carecen de normativa específica en materia de calidad geométrica de la vía**. Esta realidad ha provocado prácticas como la **adopción directa o la extrapolación de valores normativos de tolerancias geométricas aplicables a líneas de ferrocarril convencional**. Siendo tantas las variables que intervienen en la respuesta dinámica de un vehículo ferroviario (velocidad de circulación, frecuencias propias de vibración de las masas del vehículo, geometría y defectos de la vía), y dadas las evidentes diferencias de las líneas de tranvía con respecto a las de ferrocarril convencional, en términos de carga por eje del vehículo, homogeneidad del tráfico, velocidad de circulación, radios de curvatura del trazado en planta, rigidez de la plataforma, etc., dicha extrapolación de tolerancias no resulta para nada evidente.

Clase de tipo	I	II	III	IV	V
<b>Rango de velocidades (km/h)</b>	$V \leq 80$	$80 < V \leq 120$	$120 < V \leq 160$	$160 < V \leq 220$	$V > 220$
<b>Parámetros</b>					
Ancho de vía (mm) (valor diseñado/medido)	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$
Nivelación transversal (mm) (valor diseñado/medido)	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 2$	$\pm 2$
Nivelación longitudinal (mm) (valor medio a pico) Cuerda simétrica de 10 m	$\pm 6$	$\pm 5$	$\pm 4$	$\pm 4$	$\pm 3$
Nivelación longitudinal (mm) (valor pico a pico) Cuerda simétrica de 10 m	5	4	4	3	3
Alineación (mm) (valor medio a pico) Cuerda simétrica de 10 m	$\pm 5$	$\pm 4$	$\pm 4$	$\pm 3$	$\pm 3$
Alineación (mm) (valor pico a pico) Cuerda simétrica de 10 m	5	4	4	3	3
Alabeo (mm/m) (Línea de referencia cero a pico calculada en una base de 3 m)	$\pm 1,5$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$

Tabla 7. Tolerancias de recepción de vías renovadas y nuevas.

Fuente: UNE-EN 13231-1

Sólo en la normativa europea más reciente en materia de calidad geométrica de la vía (concretamente: UIC 518, UNE-EN 13231-1 y UNE-EN 13848-5), se definen **valores límite para los distintos parámetros geométricos en función de la velocidad de circulación**, que es un factor imprescindible para la evaluación de la calidad de una vía.

En cualquier caso, dichas tolerancias parecen estar basadas en la experiencia de los principales ferrocarriles europeos, es decir, que no se sustentan en ningún cálculo. Además, incluso en estas normativas siguen sin tenerse en cuenta el resto de características específicas de la superestructura de las líneas de ferrocarriles urbanos, que las distinguen de las ferroviarias convencionales y que pueden tener una gran influencia en la calidad de la circulación y en el confort de los pasajeros.

El desconocimiento de una metodología que permita extrapolar adecuadamente las tolerancias de estas normas para la superestructura de los tranvías da lugar a que cada administración acabe exigiendo a las empresas constructoras unas tolerancias distintas para la recepción de sus nuevas (o renovadas) infraestructuras tranviarias. Para ejemplificar esta realidad, se presentan en la tabla siguiente las tolerancias geométricas exigidas en la construcción de los tranvías de Barcelona, Valencia, Tenerife y Dublín.

El hecho de adoptar unas tolerancias inadecuadas (en general, demasiado exigentes) da lugar a superestructuras sobredimensionadas y, en consecuencia, a una disminución importante de la eficiencia de los trabajos en términos de tiempo de ejecución y coste.

PARÁMETRO	ÍNDICE	TOLERANCIA recepción vía nueva			
		BARCELONA	VALENCIA	TENERIFE	DUBLÍN
ALINEACIÓN	Nominal - pico	±4mm	±30mm	±3mm	±5mm
	Variación en recta	0,5mm/m (cuerda 10m)	3mm/5 m	2mm/3m	3mm/3m
	Variación en curva	--	Pico-pico:±5mm (20<R<200)m  Pico-pico:±3mm (200<R<500)m	--	--
NIVELACIÓN LONG.	Nominal - pico	±2mm	±20mm	±3mm	±5mm
	Variación	0,5mm/m (cuerda 10m)	3mm/5m	2mm/3m	1,5mm (cuerda de 10m)
PERALTE	Nominal - pico	±2mm	--	±1mm	±2mm
	Variación (alabeo)	0,4mm/m	3mm/5m	3mm/5m	1mm/m
ANCHO	Nominal - pico	0, +2mm	±2mm	±1mm	±2mm
	Variación	1mm/m	--	1mm/m	±2mm/3m

Tabla 7. Tolerancias de recepción exigidas en algunos tranvías de reciente construcción.  
 Fuente: COMSA S.A.

En vista de las evidentes carencias en el marco normativo por lo que respecta a la calidad de vía de las redes tranviarias, el objetivo último de este trabajo es la propuesta de una metodología de estimación de tolerancias geométricas basada en criterios de confort del pasajero.

## 2. Interacción vía-tranvía. Análisis dinámico

La principal excitación de los vehículos ferroviarios al recorrer una vía proviene de las irregularidades en la geometría de ésta.

Se supone un caso teórico en el que los defectos de la vía fueran ondas armónicas (sinusoides, por ejemplo). Cuando un sistema oscilante (el vehículo) recorre una **onda armónica espacial** (un defecto regular de la vía) a una velocidad  $V$ , se ve sometido a una **excitación armónica temporal** que provocará en las distintas masas del vehículo una determinada respuesta en forma de vibración, también temporal.

La frecuencia de una onda espacial se define como el número de ciclos por unidad de longitud, mientras que la frecuencia de una onda temporal es el número de ciclos por unidad de tiempo. Así, la velocidad a la que se recorre una onda espacial (unidades de espacio/tiempo) sirve como factor de conversión de frecuencia espacial ( $f_{espacial}$ ) a frecuencia temporal ( $f_{temporal}$ ), pudiéndose conocer la frecuencia de la excitación temporal a la que el vehículo se ve sometido si se sabe previamente el valor de la frecuencia de la irregularidad espacial.

$$f_{temporal} = V \cdot f_{espacial} \quad (1)$$

O bien:

$$f_{temporal} = \frac{V}{L_{espacial}} \quad (2)$$

Siendo  $L_{espacial}$  la longitud de onda espacial del defecto de la vía.

Una conclusión importante de este análisis es el hecho de que **la frecuencia de la excitación armónica temporal depende no sólo de la longitud de onda armónica espacial sino también de la velocidad de circulación**, creciendo proporcionalmente con ésta.

Cualquier defecto geométrico de una vía puede modelizarse mediante una función espacial  $G(s)$ , siendo  $s$  la posición medida sobre la vía. Pero resulta evidente que el registro de una determinada irregularidad de la vía no responde a una función armónica. Sin embargo, la generalización de lo expuesto para un defecto de tipo sinusoidal a un registro de defectos reales es posible gracias al denominado **Análisis de Fourier**. De acuerdo con la Teoría de Fourier, toda señal que cumpla unas determinadas características puede ser representada por una serie de sumas trigonométricas en senos y cosenos relacionadas armónicamente. Es decir, que cada una de las señales representando un defecto de la vía puede ser descompuesta en una suma de infinitas funciones periódicas, caracterizadas por sus correspondientes amplitud y frecuencia o, equivalentemente, por su amplitud y su longitud de onda.

Entonces, siguiendo con la notación adoptada, la función  $G(s)$ , que a priori se considera continua, podría descomponerse según la expresión:

$$G(s) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \cos(2\pi f_n s) + b_n \sen(2\pi f_n s)] = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n \sen(2\pi f_n s + \varphi_n)] = \sum_{n=0}^{\infty} C_f n \quad (3)$$

Donde  $C_f(s)$  son los componentes armónicos en que se descompone la señal original tras aplicar la transformación de Fourier.

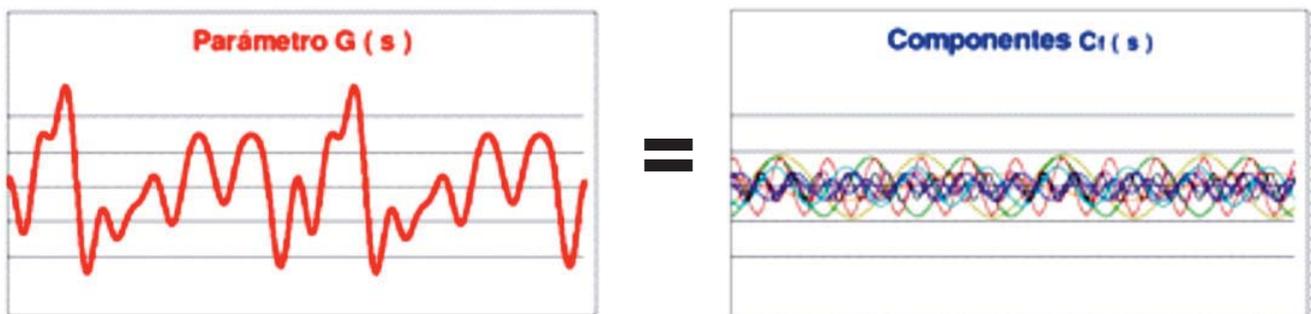


Figura 2. Descomposición de la función  $G(s)$  en una suma de ondas armónicas espaciales  $C_f(s)$ .

Por consiguiente, cuando un vehículo recorre una vía con una velocidad  $V$ , cada una de las infinitas ondas armónicas espaciales que constituyen las irregularidades geométricas de la vía se transforma en una excitación armónica temporal. Estas excitaciones producen en los distintos componentes del vehículo una respuesta dinámica. La amplitud de las oscilaciones del vehículo ( $A_p$ ) depende de:

- La amplitud de las excitaciones ( $A_e$ ).
- La proximidad entre la frecuencia de las excitaciones ( $f_e$ ) y alguna de las frecuencias propias de las masas del vehículo.

Esto queda perfectamente explicado con la representación gráfica de la Función de Respuesta Frecuencial.

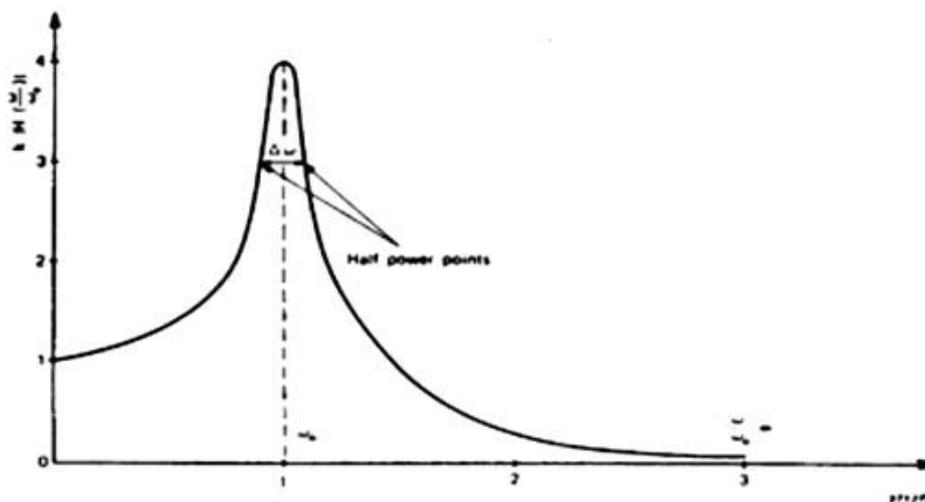


Figura 3. Función de Respuesta Frecuencial para el cuerpo de un vehículo ferroviario.

Este fenómeno, que tiene como consecuencia grandes amplificaciones dinámicas de la vibración de respuesta del sistema, debido al acoplamiento de la frecuencia de la excitación con la frecuencia propia, se conoce como **resonancia** del sistema.

Tras este análisis conceptual, se evidencia que, para que la reparación de una vía sea efectiva, es necesario **corregir principalmente aquellos defectos que provocan resonancias con los diferentes elementos de los vehículos**. Dichos defectos pueden identificarse mediante la ec. 3, imponiendo la condición  $f_{temporal} \approx f_p$ ; los datos necesarios son la velocidad de circulación del vehículo y las frecuencias propias de vibración de las masas que lo constituyen (masas suspendidas, masas semi-suspendidas y masas no suspendidas), y lo que se obtiene es la longitud de onda de los defectos más perjudiciales.

### 3. Análisis de la calidad geométrica de un tramo de vía

El tramo de vía seleccionado para el análisis corresponde a una sección del tranvía de Barcelona perteneciente a la línea del Trambaix y comprendida entre las estaciones *Les Aigües* y *Cornellà Centre*. Es un tramo de **540 m** de longitud cuyo trazado presenta una sucesión de curvas de radios que van desde aproximadamente los **40 m** hasta los casi **400 m**.



Figura 4. Ubicación del tramo de vía experimental.

El dato de partida de este estudio son los **registros de geometría de vía primaria** de la última campaña de auscultación, realizada en agosto de 2004 por la empresa COMSA EMTE, encargada del mantenimiento de la superestructura tranviaria de Barcelona.

El objetivo de este estudio es evaluar la “magnitud” de los **defectos de la vía** del tramo experimental, y para ello es necesario procesar la señal primaria mediante distintas técnicas. El post-proceso se ha llevado a cabo con un *software* específicamente desarrollado para el auscultador KRAB (que es el que se utilizó en la campaña de 2004); los dos tratamientos a realizar son los siguientes:

- Filtración de la señal primaria.
- Descomposición de la señal filtrada en distintas longitudes de onda. Análisis espectral.

La longitud de onda de los **defectos de la vía** se encuentra contenida en un determinado rango. En la norma europea UNE-EN 13848-1, se definen 3 rangos de longitud de onda de los defectos de la geometría de la vía:

- **D1**:  $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$
- **D2**:  $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$ .
- **D3**:  $70 \text{ m} < \lambda \leq 150 \text{ m}$  (para la nivelación longitudinal).  
 $70 \text{ m} < \lambda \leq 200 \text{ m}$  (para la alineación).

Además, y como se ha expuesto en el apartado 2.2 de este artículo, determinadas longitudes de onda de estos defectos son más perjudiciales que otras para el vehículo, en función de si pueden provocar resonancia en alguna de sus masas.

La filtración de señales es un proceso mediante el cual **se eliminan (o se atenúan) determinados componentes no deseados de una señal**. En el caso de estudio se ha empleado el filtro *Butterworth* de 4º orden para quedarse solamente con los componentes de los registros originales comprendidos en las siguientes bandas de longitud de onda:

- $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$ , para los registros de defectos de nivelación, alineación y peralte.
- $0.5 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$ , para defectos de ancho.

A continuación, se ha utilizado la teoría de las **Serios de Fourier** para descomponer el registro filtrado en sus distintos armónicos (sinusoides), con el objeto de separar y caracterizar (mediante su amplitud y su longitud de onda – o frecuencia-) cada uno de los defectos presentes en la vía estudiada.

Concretamente, lo que se ha empleado es la **Transformada Discreta de Fourier (TDF)**, puesto que el registro de defectos no es más que una serie discreta de  $N$  observaciones tomadas con una distancia de muestreo  $\Delta x$  ( $\Delta x = 0.25$  m, en el caso del auscultador KRAB). La teoría de Fourier para el caso discreto permite obtener, exclusivamente, una **serie finita de amplitudes** asociadas a unas longitudes de onda contenidas en el intervalo  $[2\Delta x, L]$ .

Lo que se presenta como resultado de la descomposición del registro filtrado no es un gráfico como el de la figura 3, en el que se superponen los distintos armónicos, sino el llamado **espectro del registro**, también denominado **periodograma** en otra bibliografía (concretamente en el libro de Melis Maynar, “*Apuntes de Introducción a la dinámica vertical de la vía y a las señales digitales en ferrocarriles*”). La definición práctica del espectro de un registro geométrico de una vía, de carácter discreto, no es más que la **representación de las amplitudes de las componentes armónicas del registro en las ordenadas versus las longitudes de onda o las frecuencias asociadas en las abscisas**.

Con los tres gráficos siguientes se muestra la evolución del post-proceso y los resultados obtenidos en cada una de sus etapas. Dichos gráficos corresponden al parámetro de alineación de la vía.

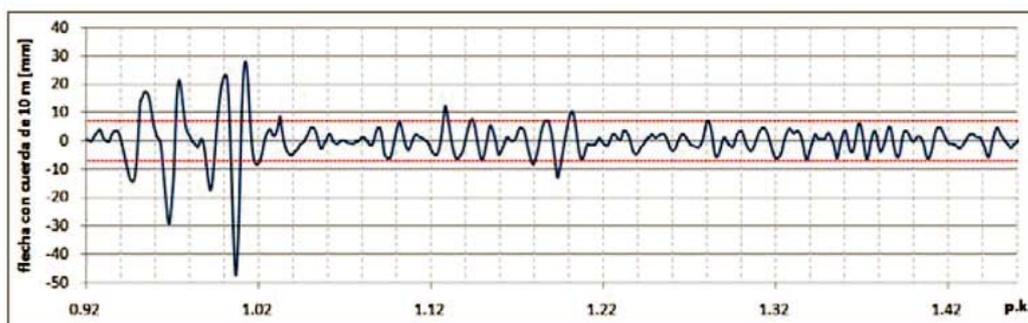


Figura 6. Señal filtrada (o dinámica) del registro de alineación del tramo experimental.

Se muestra a continuación la señal filtrada (también denominada “señal dinámica”) del registro de alineación anterior tras la sustracción de la línea media. Además, vienen indicadas con una línea discontinua roja las tolerancias de la norma UNE-EN 13231-1.

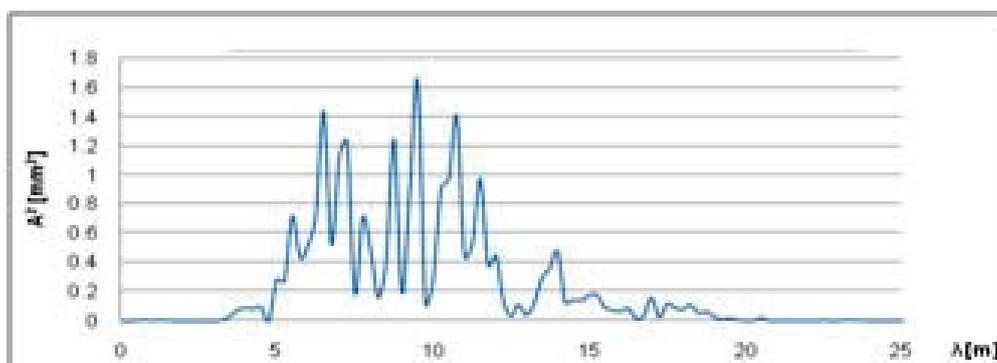


Figura 7. Espectro de la alineación dinámica.

En la segunda etapa de post-proceso se obtiene el espectro de la señal dinámica en la banda de longitudes de onda de 0 m -25 m.

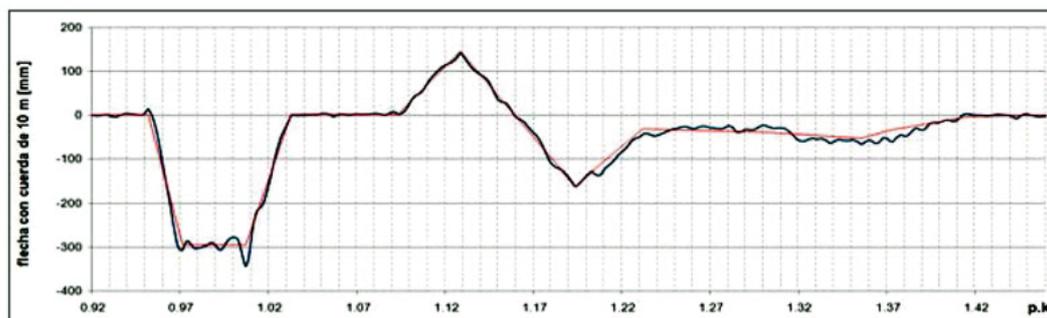


Figura 5. Registro primario de alineación del tramo experimental.

El **análisis de calidad geométrica** propiamente dicho se lleva a cabo tras el post-proceso de los registros originales del tramo de vía experimental. Consiste en la **caracterización estadística** de los registros dinámicos de banda limitada (señal filtrada). Dicha caracterización se lleva a cabo dividiendo el tramo experimental en **16 subsecciones** de longitud variable, coincidiendo con tramos de geometría en planta homogénea (rectas, curvas de transición y curvas circulares), y calculando para cada subtramo los siguientes estimadores muestrales: **máximo** y **mínimo**, **media aritmética**, **media geométrica**, **desviación típica** (muestral), **varianza** (muestral), **asimetría** y **curtosis**. Las tablas de resultados del análisis de calidad geométrica pueden consultarse en el documento completo de la tesina.

#### 4. Metodología de estimación de tolerancias geométricas para el tranvía aplicando criterios de confort

A lo largo de este trabajo de investigación se ha venido alimentando la idea de que la aplicabilidad de la normativa existente de calidad de vía ferroviaria al caso de ferrocarriles urbanos ligeros queda en entredicho.

Tras haber ahondado en el campo de la dinámica ferroviaria y de la modelización de la interacción vía-vehículo, se evidencia que el grado de complejidad de plantear una metodología completa que permita, a partir del conocimiento de la geometría tipo de una vía tranviaria con defectos, establecer unas tolerancias adecuadas a las características de la superestructura, el material rodante y el servicio tranviarios es alto. Más aún teniendo en cuenta que no se ha encontrado bibliografía en la que se proponga nada parecido.

El objetivo final de proponer unas nuevas tolerancias para cada parámetro geométrico de la vía tranviaria resulta, a priori, y con los medios de que se dispone, muy ambicioso. Por ello, la metodología que a continuación se propone y describe no pretende ser más que un primer paso hacia lo que podría ser, en un futuro, y tras mucho más desarrollo, un procedimiento estándar para fijar las tolerancias geométricas particularizadas a cada tipo de infraestructura ferroviaria.

Debe quedar claro al lector, por otra parte, que el procedimiento propuesto a continuación no está validado globalmente y que algunas de las etapas sólo se plantean a nivel conceptual, sin dar resultados cuantitativos particulares del caso de estudio. Así, como adelanto y a modo de ejemplo, cabe destacar que por su complejidad técnica no se lleva a cabo la simulación por ordenador del vehículo tranviario.

En la página siguiente, se adjunta un diagrama que pretende explicar de manera gráfica el procedimiento propuesto.

En esta metodología, el criterio que rige la determinación de valores adecuados de tolerancia es el del **confort del pasajero** (o confort de la marcha), que en ingeniería ferroviaria suele estar ligado al nivel de vibraciones mecánicas que padecen los pasajeros del vehículo y a la idea de que la tolerancia humana a las vibraciones depende de la frecuencia de la excitación. Existen en la bibliografía y en la normativa específica distintos índices de confort, cuya característica común es que son **funciones de las aceleraciones medidas dentro del vehículo y de unas determinadas funciones de ponderación en frecuencia de dichas aceleraciones**.

El índice que se propone usar en esta metodología es uno de los definidos en la norma europea experimental UNE-ENV 12299, concretamente, el **índice de comodidad media**  $N_{MV}$ .

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP95}^{Wd})^2 + (a_{YP95}^{Wd})^2 + (a_{ZP95}^{Wb})^2} \quad (4)$$

Donde:

$a_{XP95}^{Wd}$  :95º centil del valor eficaz de la aceleración longitudinal (en eje X), medida al nivel del suelo, ponderada en frecuencia con la curva de ponderación  $W_d$  (definida en la norma ISO 2631).

$a_{YP95}^{Wd}$  :95º centil del valor eficaz de la aceleración transversal (en eje Y), medida al nivel del suelo, ponderada en frecuencia con la curva de ponderación  $W_d$  (definida en la norma ISO 2631).

$a_{ZP95}^{Wb}$  :95º centil del valor eficaz de la aceleración  $v$  (en eje Z), medida al nivel del suelo, ponderada en frecuencia con la curva de ponderación  $W_b$  (definida en la norma BS 6841).

### Breve descripción de la metodología

La metodología presentada tiene como punto de partida un registro filtrado (dinámico) de un determinado defecto de una vía tranviaria. Bajo la hipótesis de que el registro de partida es suficientemente representativo, en esta primera etapa se propone ajustar la serie de datos a un Modelo Autorregresivo (AR), según el cual ésta se aproxima a una combinación lineal de variables independientes más un término aleatorio (también llamado ruido). De manera formal este tipo de modelo se puede representar como:

$$y(n) = - \sum_{k=1}^p a(k) \cdot y(n-k) + u(n) \quad (5)$$

Siendo  $y(n)$  la señal dinámica del defecto en la posición  $n$  de la vía;  $y(n-k)$  (con  $k$  de 1 a  $p$ ) los valores de la señal en las  $p$  posiciones anteriores, donde  $p$  es el orden del modelo;  $a(k)$  los coeficientes de predicción a determinar y  $u(n)$  un ruido blanco gaussiano, normalmente distribuido con media nula y varianza  $\sigma^2$

**Observación:** Junto con la teoría de Fourier, los modelos AR también son empleados para obtener el espectro de una señal.

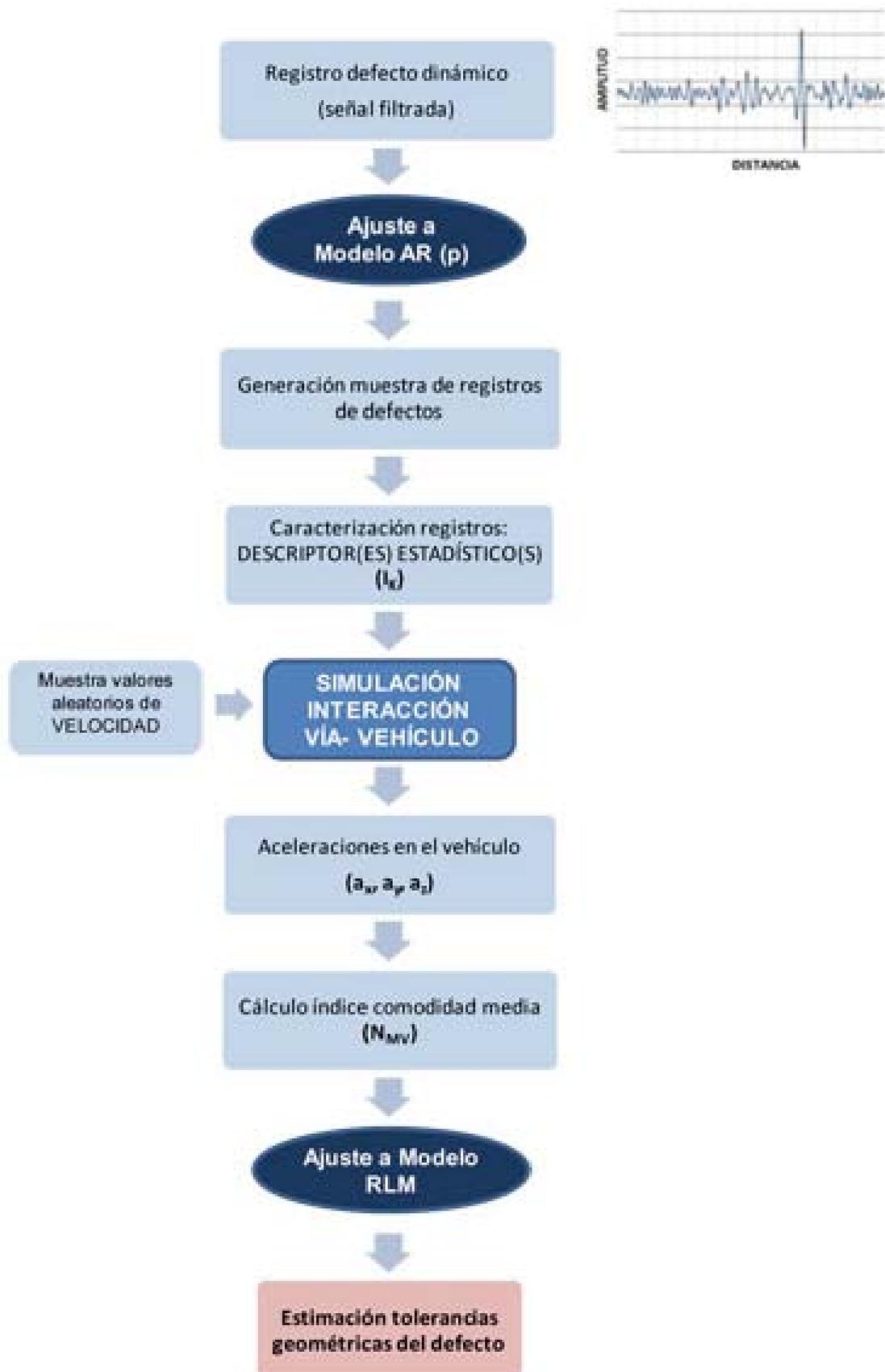


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Puesto que el fenómeno de la interacción vía-vehículo (en particular, vía-tranvía) no puede considerarse determinista en ningún caso, **tanto los defectos de la vía como la velocidad de circulación deben tener un carácter aleatorio**. Partiendo de un único registro de un determinado defecto de la vía del tramo experimental no podemos obtener un resultado cuya interpretación sea extrapolable a ningún otro caso. Por ello, la segunda etapa de esta metodología consiste en la **generación de una muestra suficientemente amplia de registros aleatorios a partir de la señal dinámica inicial**. Esta generación se lleva a cabo modificando la varianza  $\sigma^2$  del ruido blanco del modelo de predicción AR. Para cada nuevo valor de varianza se obtiene un nuevo registro de defectos.

En una tercera etapa, se calcula, para cada uno de los registros de la muestra, el **índice de calidad** que se haya escogido (descriptor estadístico sobre el que establecer las tolerancias; p.e.: valor pico, valor medio a pico, desviación típica, etc.). Se denomina genéricamente  $I_k$  al índice de calidad del registro k-ésimo. Tras haber analizado la normativa vigente en materia de calidad geométrica de la vía, **se escoge el valor pico máximo del registro (en valor absoluto) como descriptor**:

$$I_k = \max(|y_k(n)|)$$

Si el valor extremo de la amplitud de los defectos cumple la tolerancia, es evidente que todos los puntos del registro la cumplirán.

Seguidamente, debe realizarse la simulación por ordenador de la interacción dinámica vía-tranvía mediante un programa de simulación ferroviaria multicuerpo (p.e. VAMPIRE). Son muchos los datos necesarios para la simulación. En términos generales, se requiere información detallada de la geometría y las características mecánicas de todos y cada uno de los componentes del vehículo (caja, bogies, muelles y amortiguadores del sistema de suspensión, ruedas, etc.), de la geometría y los defectos de la vía y, finalmente, de la geometría del contacto rueda-carril.

El dato de salida que se requiere de esta etapa de simulación es el valor de las aceleraciones en el interior del vehículo, que son las que padece el pasajero (la posición de medición de las aceleraciones debe ajustarse a lo especificado al respecto en la norma UNE-ENV 12299). A partir de las aceleraciones obtenidas (que deberían validarse mediante la medición real de aceleraciones en el tranvía que se simule), puede calcularse el **índice de comodidad media**  $N_{MV}$  (o cualquier otro que se haya escogido). Este tipo de índices se caracterizan por ser variables de tipo categóricas con más de dos categorías. Por ejemplo, en el caso del índice  $N_{MV}$ , la escala de comodidad consiste en 5 categorías:

$N < 1$	Muy cómodo
$1 \leq N < 2$	Cómodo
$2 \leq N < 4$	Medio
$4 \leq N < 5$	Incómodo
$N \geq 5$	Muy incómodo

Para el ajuste del índice  $N_{MV}$  se elige un **Modelo de Regresión Logística Multinomial (RLM)**, que es el adecuado para este tipo de variables. Lo que se obtiene como resultado es la **curva probabilidad de cada una de las categorías del índice de confort ( $N_{MV}$ ) como función del descriptor estadístico de calidad de la vía ( $I_k$ )**. En el gráfico siguiente se muestra un ejemplo sencillo (caso de una variable dependiente con 3 categorías) de la representación gráfica de las curvas de probabilidad obtenidas con el ajuste RLM.

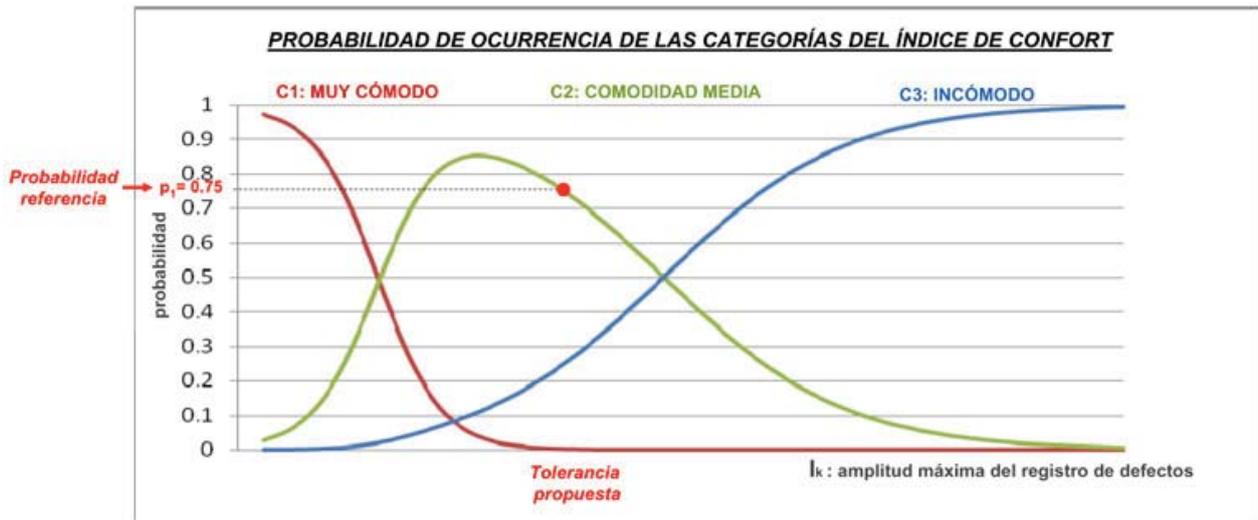


Figura 9. Ejemplo del resultado obtenido para un hipotético modelo de regresión logística multinomial.

Antes de realizar cualquier tipo de análisis a partir de un gráfico como el anterior, es necesario establecer 2 criterios:

**La probabilidad de referencia, o probabilidad mínima para que una categoría de confort se considere cierta.** Por ejemplo, podría establecerse que una categoría  $C_i$  ocurre sólo cuando su probabilidad asociada es mayor o igual a 0,75. En ese supuesto, el valor de la covariable  $X^*$  señalado en el gráfico anterior sería el valor límite del defecto para el cual se admitiría que la categoría de confort es la  $C_1$  (p.e.  $C_1 = \text{muy cómodo}$ ).

**La categoría de referencia, o categoría de confort sobre la que se van a establecer las tolerancias geométricas.** Seguramente, exigir una categoría de máxima comodidad sería un criterio demasiado estricto. Parece adecuado establecer la categoría de comodidad media para las tolerancias de mantenimiento y la categoría “cómodo” para las de recepción de vía nueva.

Se enumeran a continuación los 2 resultados principales que pueden extraerse de un gráfico como el anterior, aplicado al caso de estudio, una vez tomadas las dos decisiones especificadas:

Podría demostrarse si las tolerancias exigidas para la recepción de la vía tranviaria analizada son o no demasiado estrictas. Consistiría simplemente en comprobar qué probabilidades tienen cada una de las categorías del índice de confort, fijado dicho valor de tolerancia (valor pico máximo). La tolerancia sería demasiado exigente si la categoría de confort asociada (categoría con una probabilidad superior a la probabilidad de referencia – p.e.  $p_{ref} = 0,75$ -) fuera superior (más confortable) a la de referencia.

Podría estimarse un valor de tolerancia adecuado para cada parámetro geométrico de la vía. La tolerancia elegida sería el valor máximo de del índice de calidad  $I_k$  para el cual la categoría de confort de referencia fuera cierta.

## **5. Líneas de investigación**

Este estudio académico podría contribuir a una futura reducción del nivel de exigencia de la reglamentación actual con referencia tanto a la recepción de vía nueva o recién renovada como a la recepción de mantenimiento de líneas ferroviarias urbanas ligeras. Con ello se facilitarían los procesos constructivos y de mantenimiento, aumentando sus rendimientos y reduciendo sus costes.

Para alcanzar ese objetivo, debería estudiarse en mayor profundidad cada una de las etapas de la metodología propuesta. Los principales puntos de investigación serían los siguientes:

- **Registros geométricos de partida.** Necesidad clara de disponer de un mayor número de registros de geometría de vía tranviaria a fin de poder asumir un menor grado de incertidumbre en la representatividad de los datos.
- **Realización de la simulación por ordenador del vehículo y de la interacción vía-tranvía.**
- **Calibración del modelo de simulación.** Dado que la salida del modelo son los registros de aceleraciones en el interior del vehículo (posición especificada por UNE-EN 12299), deberían obtenerse registros reales de las aceleraciones sufridas por el vehículo al circular por el tramo de vía experimental.
- **Estudio de la interacción entre distintos defectos.** Deberían estudiarse en detalle los efectos dinámicos de la interacción de distintos defectos geométricos de la vía y su afectación a las tolerancias geométricas. A pesar de que intuitivamente parece evidente que varios defectos de vía combinados podrían producir mayores vibraciones en el vehículo, dicho fenómeno de interacción es una de las grandes ausencias en la normativa vigente.



## Estudio del comportamiento vibratorio de diferentes tipologías de vía en ámbito urbano en la línea 4 del tranvía de Alicante

### *Study of the vibrational behavior of different track types in urban area in line 4 of the Alicante Tram*

Vicente Puig Garcés<sup>\*a</sup>; Miguel Ramos Carrera<sup>a</sup>; Julia Real Herráiz<sup>b</sup>;  
Pablo Martínez Fernández<sup>b</sup>; Laura Montalbán Domingo<sup>b</sup>; Alberto Galisteo Cabeza<sup>b</sup>;  
Antonio Villanueva Segarra<sup>c</sup>

<sup>a</sup>GTP, Pda. Xirivelleta s/n, 46014 Valencia.

<sup>b</sup>Universidad Politécnica de Valencia. Dpto. de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia.

<sup>c</sup>INECO, Roger de Lauria, 19, 4º B, Edificio Park, 46002 Valencia.

#### Resumen

El presente artículo detalla la campaña de mediciones realizada por la Universidad Politécnica de Valencia en la línea 4 de la red de Tranvía de Alicante. Dicha campaña tiene como objeto estudiar el comportamiento vibratorio de las diferentes tipologías y elementos específicos instalados en la red para así obtener conclusiones válidas sobre la eficacia de cada uno de ellos. En el artículo se expone la planificación de la campaña, los sensores y esquemas de medición empleados y el procesado de datos realizado. Los principales resultados obtenidos son analizados en profundidad, siendo el más notable la superioridad de la tipología de vía en placa respecto a la vía verde en términos de mitigación de vibraciones.

*Palabras clave: vibraciones, tranvía, vía en placa, vía verde.*

#### Abstract

*This paper details the measurement campaign carried out by the Universidad Politécnica de Valencia in the line 4 of Alicante's Tram Network. This campaign aims to study the behaviour of different track typologies and elements with regards to vibration so as to assess their efficiency. The paper shows the campaign planning, the sensors used and the measurement and processing schemes adopted. The main results are thoroughly discussed, being the most relevant a clear superiority of the slab track typology when compared to the green track in terms of vibration alleviation.*

*keywords: vibrations, tram, slab track, green track.*

\* [puig\\_vicgar@gva.es](mailto:puig_vicgar@gva.es)

## **1. Introducción**

Hoy en día el ferrocarril se encuentra en auge como medio de transporte tanto a nivel urbano como interurbano debido a su reducido impacto ambiental, elevada capacidad y otra serie de ventajas. Sin embargo, como cualquier otro medio de transporte, el ferrocarril genera una serie de externalidades que deben ser tenidas en cuenta. En el ámbito urbano las más notables son el ruido y las vibraciones.

En este contexto, el presente artículo pretende exponer la campaña de mediciones realizada en la red de Tranvía de Alicante en el marco del proyecto de investigación TRAVIESA (TRANsmisión de VIBraciones al entorno: EStrategias, tecnologías y materiales para su Atenuación). Este proyecto ha sido posible gracias a su aprobación por parte del Ministerio de Fomento y a la financiación proporcionada por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Su motivación es estudiar la generación de vibraciones en el ámbito del ferrocarril urbano, su propagación a través del terreno y su afcción a edificaciones colindantes.

En el marco de dicho proyecto, la campaña de mediciones realizada tiene como objetivo recabar datos reales que permitan estudiar el fenómeno a nivel de vía y evaluar el comportamiento de diferentes tipologías presentes en la red y de ciertos elementos específicos de mitigación. Estos datos servirán de base para el posterior desarrollo de modelos matemáticos y el diseño de nuevos sistemas de mitigación.

La campaña consiste en la toma sistemática de registros de aceleración en diferentes puntos de la vía al paso de los vehículos durante jornadas completas. Para ello se emplean acelerómetros triaxiales, cuyos registros son posteriormente filtrados y procesados. De los espectros de vibración así obtenidos se estudia el fenómeno de vibración en función del tipo de vía, velocidad del vehículo, etc.

## **2. Ámbito de estudio**

El ámbito de estudio del presente artículo es la línea 4 de la Red de Tranvía de Alicante, construida por GTP<sup>1</sup> y operada por FGV<sup>2</sup>, y más concretamente el llamado bucle de San Juan. Cabe mencionar que la implicación de ambos entes públicos ha sido de vital importancia para la correcta realización de la campaña de mediciones así como de otras actividades asociadas al proyecto TRAVIESA. Además, es de destacar la preocupación de GTP por instalar en este tramo una gran variedad de tipologías y elementos específicos de atenuación de vibraciones, lo que lo convierte en un lugar de gran interés para el estudio del fenómeno vibratorio.

Dentro del bucle de San Juan se monitorizan varias secciones diferentes atendiendo a dicha variedad de tipologías y elementos. De todas ellas, a continuación se describen las que constituyen el ámbito de los análisis recogidos en el presente artículo:

### **Sección B1**

La primera sección se encuentra dentro de la Avenida de las Naciones en el PK 3+400. Se configura como vía en placa de hormigón con carril Phoenix 37N, embebido en elastómero vertido TIPO 1<sup>3</sup>[Figura 1]. Con respecto al trazado, se encuentra dentro de una recta en planta y en alzado se ubica en un tramo en pendiente de -0.528%.

---

<sup>1</sup> Ente Gestor de la Red de Transportes y Puertos de la Generalitat Valenciana.

<sup>2</sup> Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana

<sup>3</sup> El nombre comercial y las características de los elastómeros presentes en vía son confidenciales, de ahí que se denominen TIPO 1 y TIPO 2 en el texto.



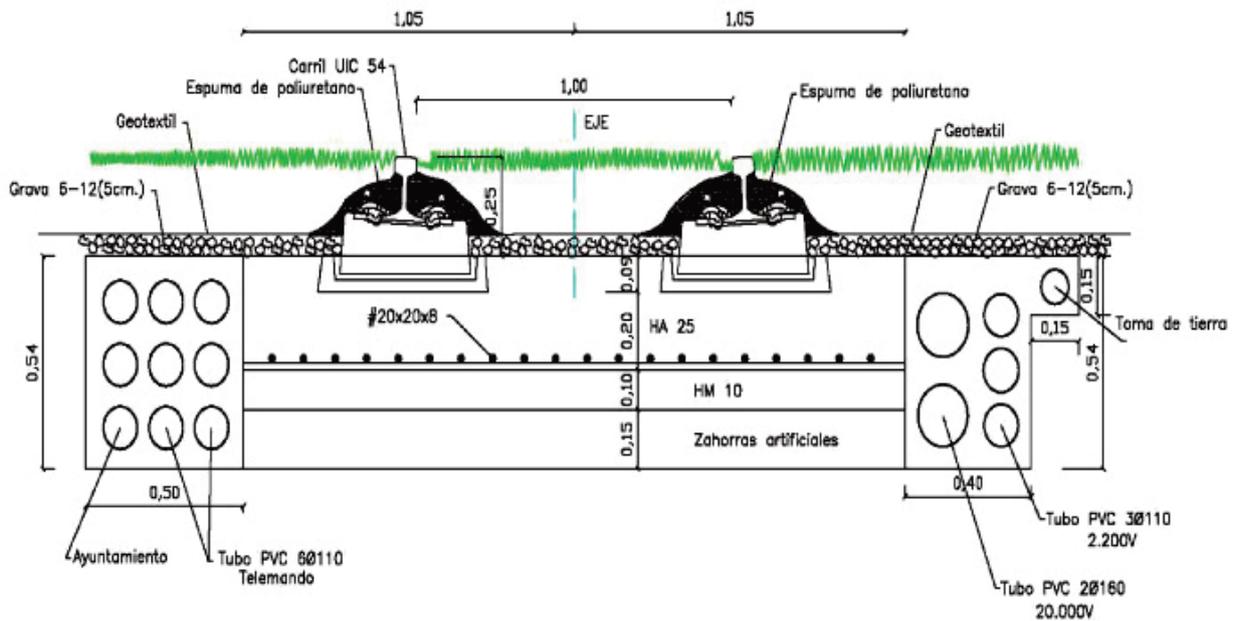


Figura 2. Vista transversal de la sección B4. Fuente: GTP

### 3. Equipos y planificación

#### 3.1. Sensores

Para la campaña de mediciones se han empleado acelerómetros triaxiales modelo FastTracer con las siguientes características:

Estos sensores poseen tecnología capacitiva MEMS (MicroElectroMechanical Systems) y cuentan con un sistema de auto calibración y diagnosis que garantiza la validez de las mediciones. Para su uso se conectan directamente a un ordenador portátil a través del puerto USB, y la señal es captada y almacenada mediante el paquete de software FTAnalyzer en forma de archivos txt.

<b>Rango de medición</b>	+/-2g	+/-5g
<b>Ancho de banda (Hz)</b>	0-2500	0-2500
<b>Resolución (m/s<sup>2</sup>)</b>	0,017	0,041
<b>Ruido (m/s<sup>2</sup>)</b>	0,055	0,075

Tabla 1. Características de los acelerómetros. Fuente: Proveedor

	Sensor Interior (2g)	Sensor Exterior (2g)
<b>B1</b>	30 cm	120 cm
<b>B2</b>	30 cm	120 cm
<b>B3</b>	30 cm	120 cm
<b>B4</b>	30 cm	280 cm

**Tabla 2.** Distancias de colocación de los sensores respecto al eje del carril

### 3.2. Configuración

Los sensores se disponen en cada sección siguiendo un patrón regular de manera que los registros sean comparables entre sí. Concretamente en cada sección se sitúa un sensor cerca de carril que recoja la señal tras atravesar los elementos de atenuación y otro más alejado que recoja el efecto de la losa de hormigón/tierra vegetal. Los ejes de los sensores se disponen con X en paralelo a la vía, Y perpendicular a la vía y Z vertical. En la Tabla 2 se detalla la colocación exacta de sensores en cada sección de estudio.

### 3.3. Toma de medidas

Cada sección se instrumenta durante un día completo (laborable), tomando registros al paso de todos los trenes que circulan por dicha sección desde primera hora (alrededor de las 5:30 h) hasta el cese del servicio (en torno a las 22:30 h). De este modo se pretende analizar el fenómeno vibratorio bajo diferentes condiciones de velocidad y carga.

Para cada paso de tren se toman registros en todos los sensores a una frecuencia de 8192 muestras por segundo. Cada toma de datos se prolonga lo suficiente para captar toda la señal vibratoria desde su inicio hasta su total atenuación. Además, a lo largo de cada jornada se realizan algunas mediciones en vacío para evaluar el ruido de la señal y detectar cualquier pico no relacionado con el tránsito ferroviario.

Por último, para poder considerar con detalle las variables antes mencionadas de velocidad y carga, FGV proporciona datos de las cajas negras de los vehículos con los registros de velocidad circulación. Sin embargo, en algunos casos no están disponibles los datos reales de velocidad, por lo que se estiman a partir de los acelerogramas registrados.

## 4. Procesado de datos

Para un correcto análisis de los datos se requiere un procesado previo de los mismos. En primer lugar, los ficheros txt obtenidos mediante el software FTAnalyzer son importados al paquete de software matemático Wolfram Mathematica 7. Este programa se emplea como principal herramienta de tratamiento de los datos.

De los ficheros importados se obtiene, en primer lugar, el osciloscopio completo para cada medición en el eje Z (corregido por la aceleración gravitatoria). También se obtienen los picos máximos y mínimos de cada medida tanto en términos absolutos como en valor promedio. A continuación a cada listado de datos tiempo/aceleración se le aplica la Transformada Discreta de Fourier, obteniéndose así el espectro frecuencia/amplitud. El análisis espectral de las mediciones permite estudiar la señal vibratoria descompuesta en sus diferentes componentes de frecuencia.

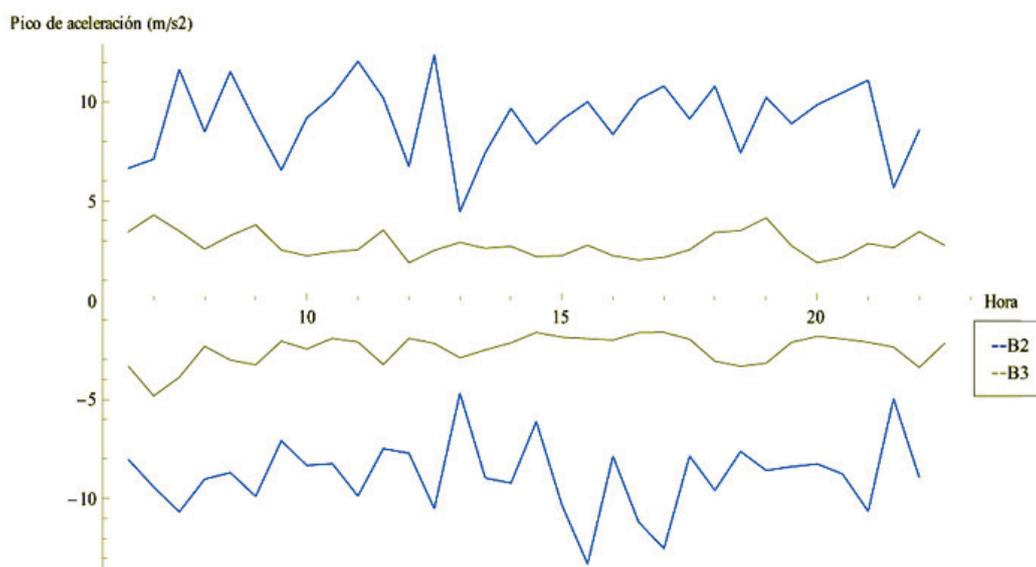
Por último se realiza un proceso de filtrado que elimine el ruido de la señal por comparación con los registros en vacío y los picos anómalos no causados por el paso del tranvía sino por otros factores (ej. tráfico viario).

## 5. Resultados y análisis

En un primer lugar, se va a comparar la eficacia mitigadora de los diferentes elastómeros y elementos de aligeramiento instalados en las secciones de vía en placa (B1 a B3). Un factor clave a considerar es la velocidad de paso de los tranvías, cuyos valores promedio se muestran en la Tabla 3.

Sección	Velocidad media (m/h)
<b>B1</b>	24,13
<b>B2</b>	28,41
<b>B3</b>	23,76
<b>B4</b>	20,76

**Tabla 3.** Velocidad media en las secciones del tramo B



**Figura 3.** Evolución de picos a lo largo del día en B2 y B3 (sensor interior)

De la tabla se deduce que los valores de velocidad son bastante similares, y por tanto este factor se puede obviar en el siguiente análisis. A continuación se muestra la evolución de los picos máximos y mínimos de aceleración a lo largo del día en las secciones B2 y B3 para el sensor más próximo a la vía [Figura 3] y para el más lejano [Figura 4].

La Figura 3 muestra un mayor registro de aceleración en la sección B2 respecto a la B3 en el sensor interior (a 30 cm del carril). Por el contrario, la Figura 4 muestra cómo ambas señales se atenúan a un nivel muy similar en el sensor exterior (a 120 cm del carril) por efecto de la propia losa de hormigón. Todo esto indica que, a corta distancia del carril y bajo condiciones similares la sección B2 registra más vibración. Esto puede achacarse al elemento de poliuretano instalado como aligeramiento, pues es la única diferencia

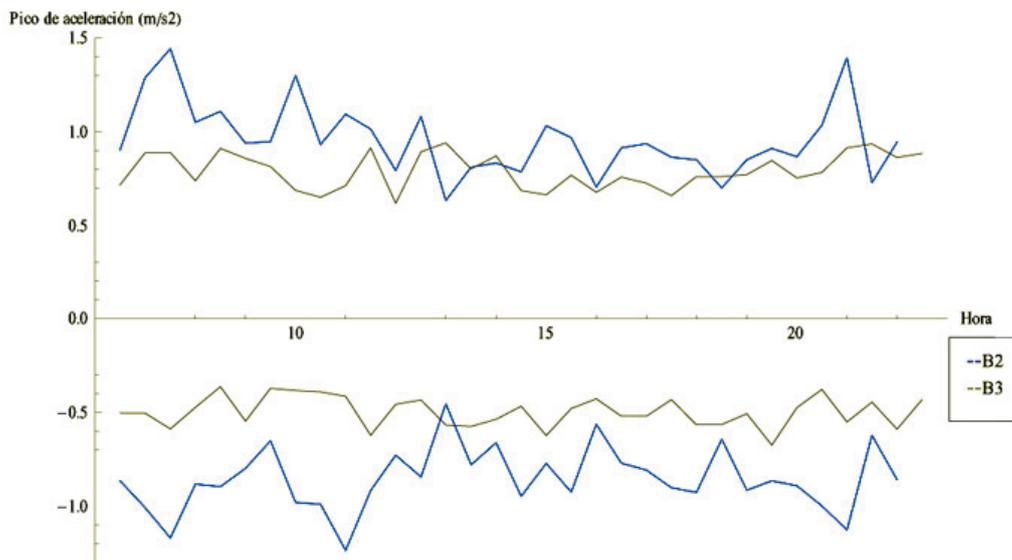


Figura 4. Evolución de picos a lo largo del día en B2 y B3 (sensor exterior)

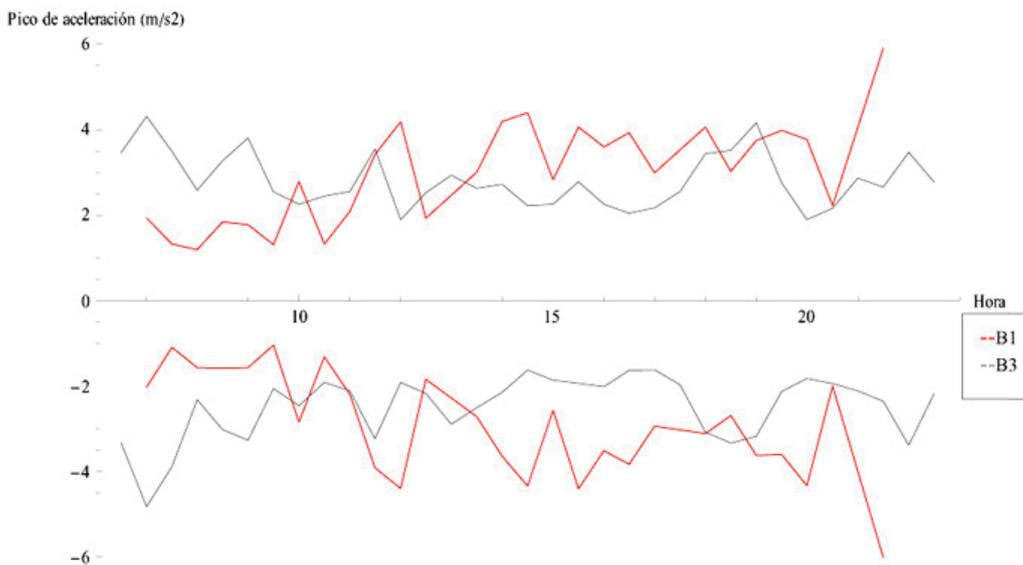


Figura 5. Evolución de picos a lo largo del día en B1 y B3 (sensor interior)

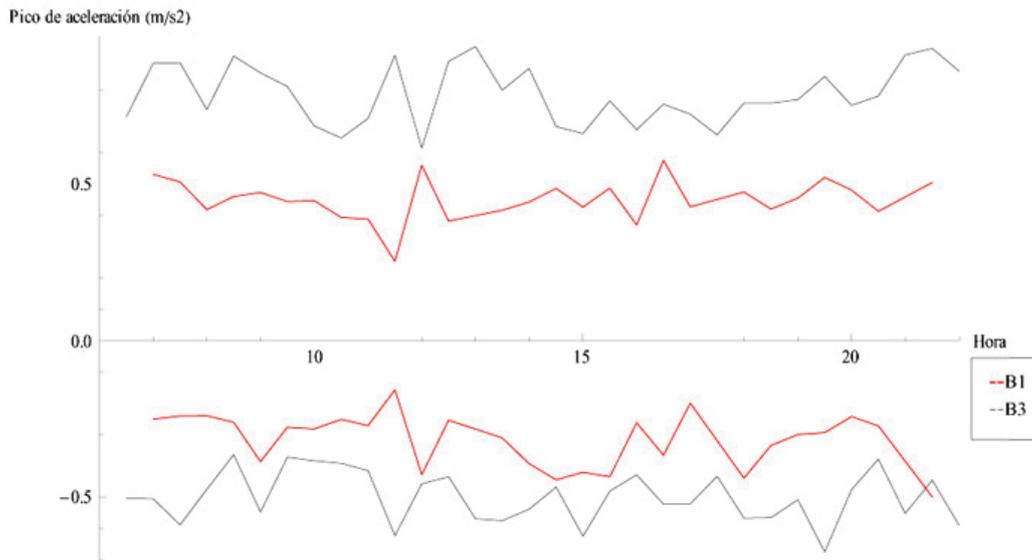


Figura 6. Evolución de picos a lo largo del día en B1 y B3 (sensor exterior)

estructural respecto a B3. Por tanto, se puede concluir que el aligeramiento de poliuretano resulta más desfavorable que el de hormigón en términos de vibración, si bien la diferencia de picos se atenúa hasta niveles similares en ambas secciones con la distancia.

En cuanto a la comparación entre elastómeros, las Figuras 5 y 6 muestran los mismos resultados que las anteriores pero para las secciones B1 y B3.

En la primera gráfica se observa que la señal de vibración es muy similar entre ambas secciones en el sensor interior lo que, teniendo en cuenta que la velocidad media es también muy parecida, indica un comportamiento equiparable entre ambos tipos de elastómero. En el sensor exterior sí parece haber una cierta diferencia de atenuación en favor de la sección B1, pero es de poca magnitud y podría deberse a la propia placa de hormigón (ej.: irregularidades o discontinuidades puntuales).

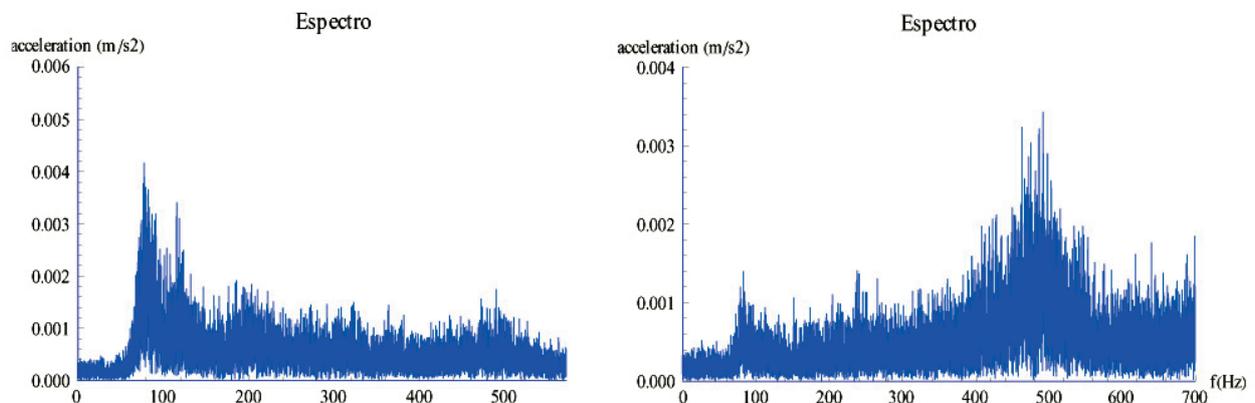


Figura 7. Espectro de frecuencias. Izquierda: B3. Derecha: B1 (sensor interior)

Lo que muestra la Figura 7 es la comparación del espectro de frecuencias entre ambas secciones en el sensor interior. De estas gráficas se observa que, si bien los picos máximos en promedio pueden ser similares entre ambas secciones, sí existe cierta diferencia cuando la señal se descompone por frecuencias. Así, el elastómero presente en B1 (TIPO 1) parece mitigar preferentemente las frecuencias más bajas mientras que el elastómero de B3 (TIPO 2) muestra un pico mayor a dichas frecuencias y en cambio atenúa mejor las componentes de frecuencia superior dentro del rango mostrado.

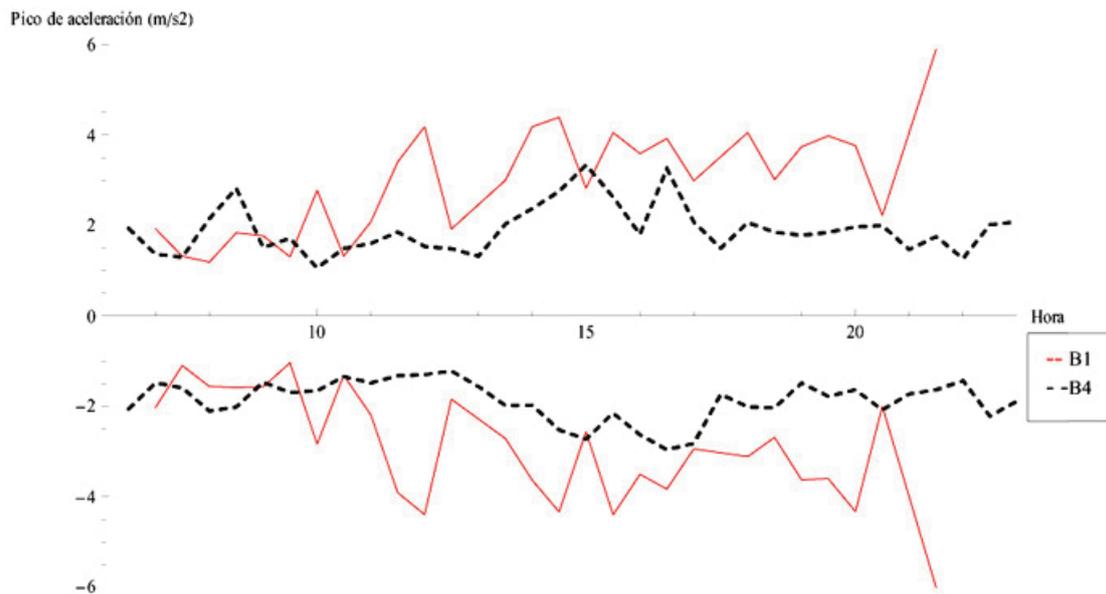


Figura 8. Evolución de picos a lo largo del día en B1 y B4 (sensor interior)

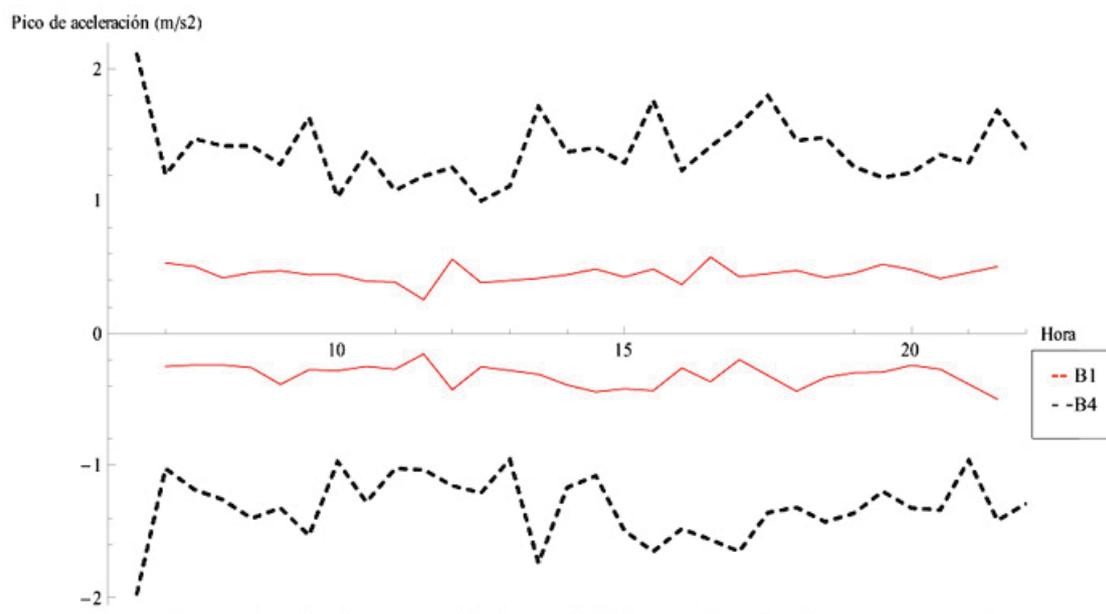
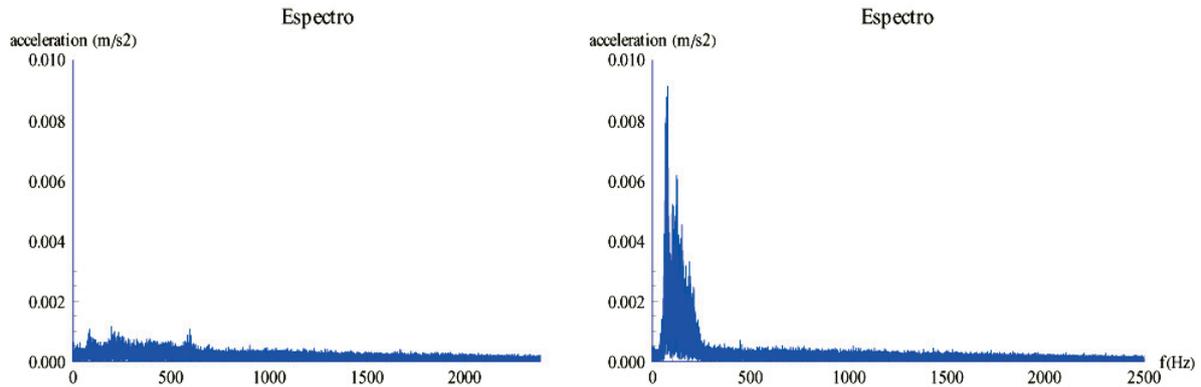


Figura 9. Evolución de picos a lo largo del día en B1 y B4 (sensor exterior)



**Figura 10.** Espectro de frecuencias. Izquierda: B1. Derecha: B4 (sensor exterior)

En cuanto a la comparación entre vía en placa y vía verde, a continuación se muestran los registros de picos máximos y mínimos correspondientes a las secciones B1 y B4 [Figuras 8 y 9].

En las gráficas precedentes se observa que la vibración es similar e incluso superior en la sección de vía en placa (B1) a nivel del sensor interior, mientras que el sensor exterior registra una señal mayor en la sección B4. Por lo tanto, se deduce que una onda de similar magnitud se disipa mucho menos a través de la capa de tierra vegetal que a través del hormigón. Esta conclusión se ve refrendada por el hecho de que el sensor exterior está situado a 280 cm del carril en B4, por los 120 cm de B1.

La comparación entre ambas tipologías también se puede hacer en términos de frecuencia [Figura 10]. De los espectros se deduce que, efectivamente, la vía verde muestra todavía una señal con un pico muy acusado a baja frecuencia, mientras que la vía en placa muestra un espectro mucho más reducido en todo el rango considerado.

Todo esto indica que la menor eficacia de la vía verde se produce fundamentalmente para las frecuencias más bajas, lo cual es debido a la menor rigidez global de la capa de tierra vegetal frente a la losa de hormigón.

## 6. Conclusiones

A partir de los resultados analizados se extraen las siguientes conclusiones de la campaña de medición realizada:

La velocidad es un factor fundamental. A igualdad de otros factores, una mayor velocidad de paso del vehículo ferroviario implica una mayor magnitud de vibración generada.

Las características mecánicas de los materiales, fundamentalmente su rigidez, también son un factor a tener en cuenta. Materiales más rígidos parecen atenuar mejor las frecuencias más bajas, mientras que los materiales más flexibles actúan mejor sobre las más altas.

No existe diferencia significativa entre los dos tipos de elastómero instalados en lo que se refiere a los picos máximos de aceleración obtenidos. Sí la hay, en cambio, entre los espectros de frecuencia que genera cada uno. El elastómero TIPO 1 muestra picos a frecuencias mayores que el TIPO 2.

Existe una diferencia notable en los picos de aceleración según el tipo de elemento para aligerar instalado en la cazoleta, siendo más desfavorable el de poliuretano.

La vía en placa resulta más eficiente que la vía verde a la hora de mitigar la vibración generada por el paso del vehículo. Esto es particularmente notable para el rango de frecuencias más bajo.

## **Bibliografía**

BALACHANDRAN, Balakumar y MAGRAB, Edward (2006): Vibraciones. Editorial Thomson. Mexico D.F.

LÓPEZ PITA, Andrés (2006): Infraestructuras ferroviarias. Editorial UPC. Barcelona.

GERE, James (2004): Timoshenko: Resistencia de materiales. Editorial Thomson Paraninfo. Madrid.

AMBARDAR, Ashok (2002): Procesamiento de señales analógicas y digitales. Editorial Thomson. Mexico D.F.

