

CON  
TÉCNICA  
C

C

E

L

O

C



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

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

# via libre TÉCNICA INVESTIGACIÓN FERROVIARIA

RECOPIACIÓN  
DE ARTÍCULOS  
Número 1



marzo 2011

**Editores: José Mariano Martínez Rodríguez / Miguel Jiménez Vega**  
**Director de Investigación, Formación y Colaboración Científica: Alberto García Álvarez**  
**Directora de Vía Libre: Pilar Lozano Carbayo.**

**Edita: Fundación de los Ferrocarriles Españoles**  
**Revista Vía Libre**  
**Santa Isabel 44, 28012 Madrid**  
**Teléfonos 91 151 10 40 / 91 151 10 52**  
**[jmrodriguez@ffe.es](mailto:jmrodriguez@ffe.es) / [mjimenez@ffe.es](mailto:mjimenez@ffe.es)**  
**ISSN: 2174-0194**

**[www.tecnica-vialibre.es/](http://www.tecnica-vialibre.es/)**

## **Vía Libre Técnica Investigación Ferroviaria**

**Vía Libre aloja en su página web [www.vialibre.org](http://www.vialibre.org) una sección que bajo la denominación de Vía Libre Técnica Investigación Ferroviaria acoge artículos, estudios y comunicaciones de investigación en el mundo del ferrocarril, entendida en un sentido amplio.**

**Presentamos ahora el primer volumen, recopilatorio de los artículos que se han publicado en 2010, iniciando así nuestro compromiso de publicación impresa.**

**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 que se han tratado 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 el esfuerzo del mundo de la investigación ferroviaria y, en particular, a todos aquellos que nos han enviado sus artículos.**

**Marzo 2011**



## ÍNDICE

### Infraestructuras:

Desarrollo y experimentación del sistema M.L.G. (Metro Ligero de Granada): primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón realizado con una mezcla de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y resina de matriz polimérica.

*José Daniel García Espinel - Acciona Infraestructuras* 7

Sobre el uso de parapetos sólidos para atenuar los efectos del viento transversal en la circulación de vehículos ferroviarios.

*José Meseguer Ruiz, Sergio Ávila Sánchez, Oscar López García - UPM  
Carlos Díez Arroyo, Agustín Fernández Sanz, José Conrado Martínez - ADIF* 19

Estudio matemático de la evolución de la topología de la red española de ancho ibérico, 1956-2006.

*Eugenio Roanes Lozano - UCM, Luis M. Laita de la Rica - UPM, Eugenio Roanes Macías - UCM, Michael J. Wester - UNM, José Luis Ruiz Lozano, Carlos Roncero Clemente - U. Extremadura* 41

Cálculo de la rigidez vertical de la vía en función de las rigideces verticales de la placa de asiento y del sistema balasto-plataforma en vías de alta velocidad.

*Ramón Miralvés Buil, Luis Castejón Herrero - Universidad de Zaragoza* 47

### Explotación:

El horario cadenciado integrado. Teoría, casos de aplicación, ventajas, inconvenientes y reflexiones sobre su posible aplicación en España.

*Riccardo Lombardi - INECO* 57

### Material Rodante:

¿Podemos extender aún más la permanencia en servicio de nuestros trenes? Sí, con Refresco de Tecnología.

*Adriana Molero Alonso, Alberto Sols, Isabel Fernández Fernández* 87

## **Instalaciones:**

Innovación en comunicaciones tren-tierra.

*Emte Sistemas*

95

## **Energía:**

Actuaciones en FGC para la reducción del consumo de energía.

*José Luis Arques Patón - FGC*

107

El calor hace más veloces los trenes.

*Alberto García Álvarez - FFE*

115

## **Seguridad Técnica Ciudadana:**

Validación de modelos de ventilación en metros y túneles ferroviarios.

*Ana Belén Amado García - ZITRON*

121

Proyecto RAILCEN: estudio de la evolución de un incendio en vehículo ferroviario provocado por materiales de interiorismo de acuerdo a CEN/TS 45545-2.D

*Marta López - CIDEMCO, Izaskun Martínez - CIDEMCO, Anna Lacasta - UPC, Pasi Nylander - Patentes TALGO, Emiliano Gallego - FAINSA*

133





# DESARROLLO Y EXPERIMENTACIÓN DEL SISTEMA M.L.G. (METRO LIGERO DE GRANADA): PRIMER SISTEMA NACIONAL DE VÍA EN PLACA EMBEBIDA EN HORMIGÓN REALIZADO CON UNA MEZCLA DE CAUCHO PROCEDENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) Y RESINA DE MATRIZ POLIMÉRICA

**Jose Daniel García Espinel.**

Director del Departamento de Implantación e Innovación.  
Centro tecnológico de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras.  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
[jgarcia4@acciona.es](mailto:jgarcia4@acciona.es). Teléfono: 91 791 20 20

**Resumen:** En la obra “U.T.E Campus de la Salud-Armilla (Granada)” la Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras ha desarrollado y aplicado con éxito, en un tramo de prueba de 800 metros lineales de vía simple, el primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón utilizando una mezcla de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y resina de matriz polimérica. Este sistema permite reducir el fuerte impacto medioambiental provocado por los vertederos de neumáticos usados, destacando su alto nivel de atenuación de vibraciones, parámetro clave en un sistema de vía urbano, debido a la presencia de edificaciones cercanas.

**Palabras clave:** Caucho, neumático, vía, placa, ambiental, vibraciones, Acciona, I+D.

**Abstract:** During the construction of the project “U.T.E Campus de la Salud Armilla (Granada)” the R&D Direction of ACCIONA Infraestructuras has developed and applied successfully in a test pilot of eight hundred meters of simple track a new slab track railway system using rubber from scrap tires and resins with polymeric matrix, which it allows to reduce the high environmental impact caused by the landfills of used tires, distinguishing a high level of airborne noise, a key parameter in an urban railway system, due to presence of closed buildings.

**Keywords:** Rubber, tires, track, slab, environmental, airborne noise, Acciona, R&D.

## 1. Introducción

El sistema de transporte público ferroviario, traccionado con energía eléctrica, se presenta como la mejor alternativa con elevados ratios de eficiencia energética y sostenibilidad, ya que combina grandes niveles de calidad en cuanto a accesibilidad, capacidad, regularidad, seguridad y velocidad. Por ello numerosas ciudades pretenden potenciar un transporte ferroviario urbano sostenible.

## 2. Breve reseña histórica sobre los tranvías en Granada

En 1884 se construye el primer tranvía de Granada en Motril, siendo pionera en la construcción de este tipo de transporte. En 1903 Nicolás de Escoriza crea la compañía Tranvías Eléctricos de Granada S.A. (TEGSA), convirtiéndose en poco más de una década en una de las compañías de tranvías más importantes de España con 80 kilómetros de vías suburbanas. Las líneas de tranvía en Granada tuvieron un gran auge hasta que a finales de los años 50. A comienzos de los 60 comienza su declive, cerrándose las líneas urbanas en 1963. Unos años después dejan de circular los tranvías por la Vega de Granada, desapareciendo definitivamente en 1974.

En el año 2000, y en el marco del Plan Director de Infraestructuras de Andalucía 1997-2007 aprobado por el Decreto 108/1999 de 11 de Mayo, la Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía pone en marcha los estudios para la creación de “La Línea 1 Metropolitana del Metro Ligero de Granada”, de 16 km. de longitud, que unirá las localidades de Albolote, Maracena y Armilla con la ciudad de Granada.

El impulso de la Junta de Andalucía para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación (I+D+i), ha hecho posible la realización del tramo de prueba del sistema MLG desarrollado por la dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras, convirtiéndose en una de las administraciones que impulsan la innovación tecnológica ferroviaria, marcando un hilo en el desarrollo de la tecnología de la vía en placa de nuestro país.



**Figura 1.** Trazado Tramo III, Polígono Tecnológico de las Ciencias de la Salud – Armilla, del Metropolitano de Granada.

## 3. Estudios preliminares.

### 3.1. Introducción.

El fruto del trabajo durante dos años por parte de la dirección de I+D+i de ACCIONA en proyectos de investigación para la reutilización de residuos, es este proyecto de elementos amortiguadores de ruido y vibraciones para sistemas de vía en placa que aprovecha las ventajas del caucho procedente de los NFUs, uno de los residuos con mayor problemática, utilizando una matriz polimérica como conglomerante.

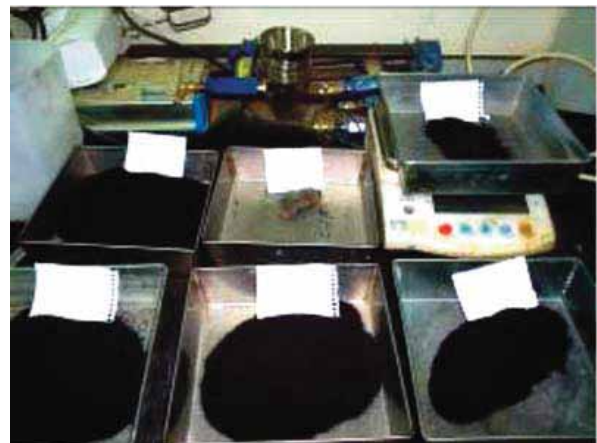
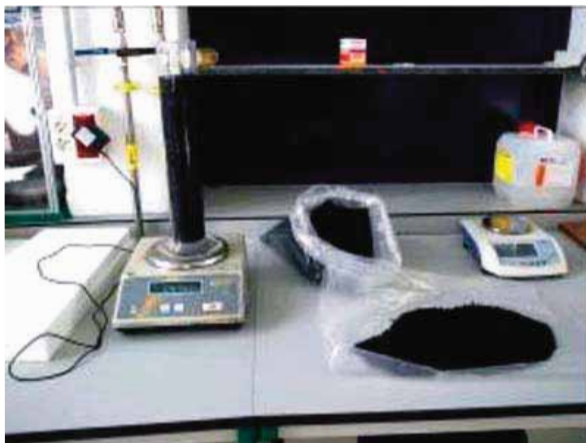
Como resultado de las expectativas puestas en este desarrollo se realizó una propuesta de I+D+i a la Corporación Tecnológica de Andalucía (CTA) presentando un proyecto con el título de **VIANDA**: “Diseño de sistema de VÍA en placa mediante la utilización de una mezcla de neumáticos fuera de uso y resina para su aplicación en líneas de ferrocarril de ANDALUCIA”, y que fue aprobada por dicho organismo.

El objeto básico del sistema es el de introducir este elemento amortiguador entre el carril y la losa de hormigón por medio de la realización previa de un encamisado del mismo que, además de envolver al carril, le aporte propiedades elásticas que amortigüen las vibraciones producidas por el paso de los trenes y, de esta manera, eviten afecciones a las edificaciones cercanas.

Este sistema ha sido desarrollado en el Centro Tecnológico de I+D+i de Madrid de ACCIONA y está patentado y protegido su propiedad intelectual por ACCIONA Infraestructuras.

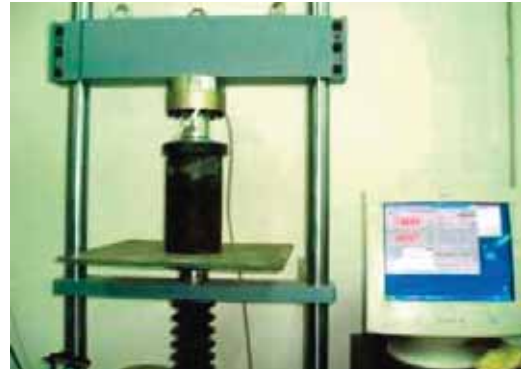
### 3.2. Caracterización del material.

Mediante estudios previos, se determinó la densidad específica, densidad aparente, porcentaje de vacíos, granulometrías y forma de NFU, así como las características físicas y químicas de la matriz (Figuras 2 y 3). Posteriormente se realizaron mezclas con dosificaciones variables a temperatura ambiente y tiempos de adquisición de propiedades próximos a las 24 horas, sin necesidad de incorporar aditivos que variaran la temperatura y aceleraran el curado. También se analizó en profundidad el comportamiento físico y mecánico de las mezclas.



**Figura 2 y 3.** Caracterización del neumático fuera de uso (NFU).

Sobre los estudios en laboratorio, se realizaron una serie de ensayos a compresión, utilizando probetas cilíndricas, con una gran variedad de dosificaciones diferentes, tanto en granulometrías, tipos de matrices y relación NFU - Matriz. Los ensayos de elasticidad proporcionaron información de las deformaciones sufridas por las probetas en función de la fuerza aplicada, para luego calcular y obtener el Módulo de Deformación a la compresión ( $E_c$ ) y su coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) (Figuras 4 y 5) de las mismas, tanto a 1, 14 y 28 días de curado, en 3 ciclos de carga y descarga por probeta ensayada.



Figuras 4 y 5. Ejemplo de probetas y ensayo a compresión simple.

Para determinar el Modulo de Deformación ( $E_c$ ), se obtiene del cálculo basado en la formulación matemática de la Ley de Hooke, ecuación de la teoría de la elasticidad, mostrada a continuación:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \varepsilon \cdot E \Rightarrow \frac{F}{S} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E \Rightarrow E = \frac{F \cdot L_0}{S \cdot \Delta L}$$

$\sigma$  : Tensión;  $\varepsilon$  : Deformación específica; E: Modulo de deformación a compresión. F: Fuerza aplicada; S: Superficie sobre la que se aplica la carga;  $\Delta L$  :Deflexión.;  $L_0$  : Altura inicial de la probeta;  $L_f$ : Altura final de la probeta.

En base a los resultados obtenidos a través de las probetas y tras la elaboración de un modelo de elementos finitos se fabricaron diferentes prototipos del Sistema M.L.G, en función del módulo de rigidez óptimo que se pretendía obtener para el sistema.

### 3.3 Elaboración de prototipos.

Una vez caracterizadas las mezclas, y su comportamiento a la deformación se pasó a fabricar los prototipos para la realización de los ensayos de comportamiento del sistema y la validación del mismo desde el punto de vista mecánico, de **35 cm. de largo** y con la sección que se observa en la Figura 6.

Una vez realizados los prototipos se ensayaron en una prensa de compresión simple para hallar su constante de rigidez estática (K) y posteriormente se hormigonaron hasta conseguir un dado con el fin de simular la losa de hormigón en la que el carril irá embebido y hallar su constante de rigidez estática final. De esta forma se calculó un factor de correlación entre las deflexiones sufridas por el carril encamisado antes de hormigonar y una vez hormigonado (Figura 7) y la relación entre las constantes de rigidez.



**Figuras 6 Y 7 :** Vista de la sección del sistema M.L.G; Vista general de los prototipos una vez hormigonado.

#### 4. Ensayos de validación del sistema

Para confirmar los valores obtenidos en los ensayos realizados en el Centro Tecnológico de I+D+i de Acciona, se enviaron prototipos al Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de Materiales (LADICIM) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander de Cantabria, para que sobre éstos se realizaran todos los ensayos necesarios para poder validar el sistema y poder comprobar su comportamiento frente a cargas estáticas, dinámicas y su comportamiento a fatiga.

Todos los ensayos que a continuación se van a describir se realizaron siguiendo el procedimiento indicado en la **Normativa de Metro de Madrid MM-EV-1-2-01: “Fabricación y homologación de vía en placa con tacos prefabricados embebidos en elastómero”**. Reseñar que, aunque esta normativa no deje de ser una recopilación de normas UNE (en especial la **Norma UNE-EN 13481-5: Sistemas de sujeción para vía en placa**), Metro de Madrid es la única administración pública en España con una normativa propia y de obligado cumplimiento para la homologación de todos los elementos de vía que se ejecutan en sus instalaciones.



**Figuras 8 ,9 y 10:** Vista general de la disposición del prototipo en el ensayo de carga vertical estática.; Vista general del prototipo en el ensayo de carga estática angular (22°); Disposición del ensayo de aislamiento eléctrico.

#### 4.1. Ensayos mecánicos.

**Cálculo de la carga equivalente del sistema.** En el caso del sistema del Metro ligero de Granada la carga equivalente del sistema es de 24 kN.

**Ensayo de carga vertical estática.** Pretende determinar la rigidez estática secante del sistema que en el sistema MLG se determina en  $K = 35 \text{ kN/mm/ml}$  (Figura 8).

**Ensayo de carga angular dinámica (22°)**(Figura 8).

**Ensayo de carga vertical dinámica** Mide el aumento de rigidez con el aumento de la frecuencia

**Ensayo de carga angular estática (22°)**.(Figura 9).

**Ensayos de fatiga.**

**Ensayo para la determinación del aislamiento eléctrico del conjunto.** (Figura 10). Finalmente se obtiene que la resistencia eléctrica del sistema es de 6,22 kΩ, por lo tanto se puede concluir que la resistencia eléctrica alcanzada por el sistema M.L.G. es superior a la requerida por la Normativa, que es de 5 kΩ.

#### 4.2. Resumen de resultados de los ensayos

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos realizados por la normativa en aplicación se comprobó que el sistema M.L.G cumplía todos los requisitos mínimos marcados por dicha normativa, por lo que se pudo validar el sistema de forma satisfactoria.

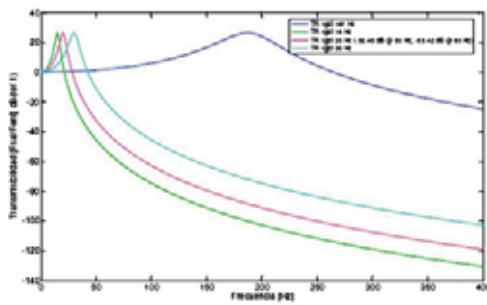
### 5. Estudio de amortiguación de vibraciones

Todos estos estudios se han realizado tomando como referencia la Norma Europea UNE-EN ISO 10846-1:1997: "Medida en Laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústico de elementos elásticos". Tras la revisión de la bibliografía existente se determinó plantear el problema desde dos puntos de vista diferentes:

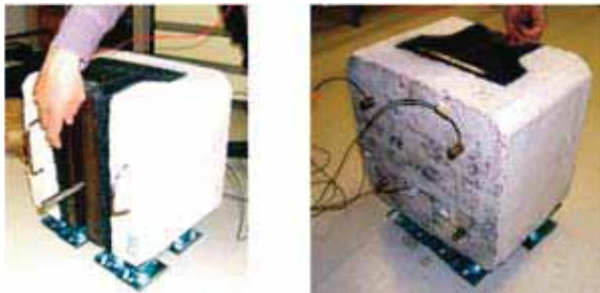
En primer lugar se realiza el estudio de las propiedades intrínsecas del sistema: Se interpreta el mismo como un sistema sencillo de un grado de libertad, sistema masa – resorte – amortiguador. Se caracteriza la atenuación de la transmisión de vibraciones de este sistema mediante el factor de transmisión ó factor de pérdidas por inserción (transmisibilidad), la relación entre la fuerza que excita el sistema y la fuerza transmitida por el sistema. Para determinar la curva de transmisibilidad del sistema M.L.G se obtienen la rigidez dinámica y el factor de amortiguamiento estructural de elemento amortiguador, a partir de la respuesta en frecuencia del sistema.

$$kd = \frac{\text{Re}(R)}{|R|^2 \left(1 - \left(\frac{f_{\text{excitación}}}{f_0}\right)^2\right)} \quad \eta = -\frac{\text{Im}(R)}{\text{Re}(R)} \left(1 - \left(\frac{f_{\text{excitación}}}{f_0}\right)^2\right)$$

**Figura 11.** Fórmula para obtener la rigidez dinámica y el factor de amortiguamiento del sistema.



**Figura 12.** Curva de transmisibilidad del sistema ante condiciones de carga reales.



**Figura 13.** Ensayo con martillo excitador y acelerómetros triaxiales.

El conocimiento de estas características permite interpretar el sistema y evaluar su funcionamiento en las condiciones de carga reales. En la siguiente figura se puede observar cómo varía la curva del sistema M.L.G según diferentes cargas (Figura 12).

En segundo lugar, y a modo de comparativa preliminar entre sistemas con diferentes propiedades, se ha evaluado la diferencia de niveles de velocidad, cuando el sistema es excitado por un impulso, antes y después del elemento elástico. Esta medida ha permitido la discriminación entre los diferentes sistemas desarrollados inicialmente (Figura 13).

De confirmarse los resultados de los ensayos sobre prototipos con los del tramo experimental, el sistema MLG se situaría como una alternativa ventajosa frente a los sistemas usados hoy en día.

Suponiendo un nivel de emisión de vibraciones de 85 dBv en la vía, una atenuación por transmisión a través del terreno de 1dBv/m y un nivel de inmisión admisible de 68dBv en el interiores de las viviendas próximas a la vía, en función de la distancia se necesitarían tres niveles de atenuación de vibraciones (Figura 14), para los cuales con los resultados de los ensayos realizados se puede determinar que el sistema M.L.G supera el máximo nivel de atenuación requerido por dichos niveles.

| Distancia      | Atenuación requerida | Atenuación Acciona MR |
|----------------|----------------------|-----------------------|
| Menor de 7m    | 19 dBv               | > 20 dBv              |
| Entre 7 y 12 m | 10 dBv               | > 20 dBv              |
| Mayor de 12m   | 6 dBv                | > 20 dBv              |

**Figura 14.** Comparativa entre valores de atenuación requeridos y esperados para el sistema M.L.G.

Uno de los problemas planteados en obra durante la ejecución del tramo de prueba fue que uno de los puntos del trazado de prueba discurre a una distancia de 15 m del edificio del Centro de Investigaciones Biomédicas, por lo que la Dirección de Obra solicitó que se estudiara la posibilidad de colocar una manta elastomérica bajo la losa de vía para aumentar la capacidad de atenuación.

Esta adición de la manta implica unas condiciones de contorno diferentes y mayores deflexiones en el carril, por lo que se debió de hacer un reestudio de la curva de atenuación y ubicar la frecuencia de la resonancia para comprobar que no exceda del valor máximo permitido.

Dicho estudio reflejó que en caso de instalar adicionalmente manta elastomérica al sistema MLG, la deflexión sufrida por el conjunto de la vía sería superior al establecido de 3 mm, mientras que la

deflexión sufrida únicamente con el sistema MLG sería de 1,81 mm, por lo que complementando estos datos con los resultados del estudio de amortiguación, que aseguraban que en todo momento se cumplieran los niveles de atenuación en edificaciones cercanas, finalmente se optó por no instalar la manta elastomérica complementaria.

## 6. Puesta en obra

La puesta en obra se realiza en dos fases independientes:

### 6.1. Encamisado de carriles:

El encamisado se realiza impregnando previamente el carril con una resina de imprimación, posteriormente se introduce en un molde que es llenado con la mezcla de NFU y resina, a la cual se le ejerce presión y temperatura para el curado. Aplicar la mezcla directamente sobre el carril garantiza la perfecta adherencia del encamisado evitando cualquier holgura y espacios vacíos.

Las dimensiones del encamisado, y por tanto de los moldes, tienen un estricto control geométrico, usando separadores en la zona de apoyo y centradores para el carril a lo largo del molde. Una vez que la resina ha adquirido las condiciones mínimas de consistencia se extrae el carril ya encamisado para trasladarlo a la zona de acopio (Figura 14).

Para poder realizar la soldadura entre carriles se deja una longitud de 1,00 m. sin encamisar en ambos extremos, que serán encamisados posteriormente in situ siguiendo un procedimiento similar al descrito anteriormente.



Figura 14. Vista general de la zona de acopio de carriles

### 6.2. Colocación de carriles:

Los carriles que ya han sido encamisados son llevados a la vía, donde después de soldarlos entre sí con soldadura aluminotérmica y realizar el remate del encamisado en dicha zona se colocan en su posición definitiva utilizando una serie de pórticos colocados cada 2,00-2,50 m de los que se suspenden los carriles.

Los carriles se fijan a cada pórtico en dos puntos que aseguran el ancho internacional de vía de 1.435 mm. Los pórticos a su vez cuentan con husillos verticales y horizontales que permiten ajustar la alineación y nivelación de la vía de forma precisa. (Figura 15). Con los carriles colocados en su posición definitiva se procede a hormigonar (Figura 16) la losa de apoyo logrando mantener la correcta posición de los carriles lo cual garantiza la elevada calidad de la vía y el confort posterior del viajero al circular por ella.



Figuras 15,16 y 17. Colocación de los carriles y desvío mediante pórticos; Vía hormigonada y acabado de adoquines.

### 6.3. Ensayos de Rigidez:



Figura 18. Auscultación de los carriles in situ previa al hormigonado

Para comprobar la correcta ejecución del encamisado de los carriles se realiza un ensayo de rigidez con una prensa móvil autónoma, que consta de un pistón hidráulico con una célula de carga montada en un bastidor anclado al suelo, dos LVDT para medir deformaciones y un registrador de lecturas. Con este conjunto se le aplica al carril una fuerza puntual y se mide la deformación del conjunto del carril encamisado. Haciendo la relación entre fuerza y deformación logramos calcular la rigidez del sistema. Los ensayos se realizan en un banco de pruebas antes de hormigonar (Figura 17) y posteriormente in situ con el carril ya hormigonado. La máquina utilizada para comprobar la rigidez in situ del elemento amortiguador de la vía en placa ha sido diseñada y patentada por ACCIONA

Infraestructuras en el Centro Tecnológico de I+D+i de Madrid.

### 6.4. Cálculo de deflexiones de vía (Tratado en el punto 5).

## 7. Ventajas del sistema MLG.

El sistema de vía embebido M.L.G. en placa de hormigón tiene innumerables ventajas, entre las que destacan:

**Transformación de un residuo (Neumático Fuera de Uso) en un recurso productivo evitando afecciones al Medio Ambiente:** Según el gestor de neumáticos fuera de uso, se revalorizan 7 neumáticos de turismo por metro lineal de vía, lo que supone un total de 5.211 neumáticos en el tramo de prueba del sistema M.L.G

**Alta atenuación de vibraciones.** En el rango de frecuencias comprendido entre 6,3Hz y 20kHz se consigue una atenuación global mayor de 20Db para este sistema. Este parámetro marca la atenuación de las vibraciones generadas por el tránsito del Metro Ligero en los edificios colindantes.

**Elevado confort del viajero al garantizar la geometría de la vía.** Los tres parámetros que marcan la calidad de la vía: nivelación, alineación y ancho de vía, se consiguen con pórticos metálicos extensibles sobre los que se sustenta la vía antes del hormigonado. Éste es el parámetro principal que repercute en el confort del viajero.

**Fácil de puesta en obra.** Los carriles llegarían a vía como un único bloque monolítico (carril+encamisado), sin posibilidad de despegues, holguras o falta de adherencia por lo que se trabajaría como si fuera un único elemento. Además, el propio encamisado haría de encofrado perdido durante las fases de hormigonado.

**Bajo coste de mantenimiento.** No tiene fijaciones mecánicas, se consigue una mayor durabilidad del carril y no es necesario realizar realineaciones de vía.

**Permite la circulación de vehículos no ferroviarios sobre la vía.** En caso de emergencia pueden circular vehículos de auxilio sobre la plataforma y se pueden realizar cruces con tráfico de vehículos no ferroviarios en calles.

**Primer desarrollo de un sistema de vía en placa nacional.** ACCIONA Infraestructuras ha desarrollado en su Centro Tecnológico de I+D+i de Madrid el primer sistema de vía en placa desarrollado íntegramente en nuestro país.

**Experiencia piloto en Andalucía.** La ejecución del tramo de prueba de 800 metros de vía simple pone a la vanguardia de la tecnología a Andalucía y en particular al metro ligero de Granada.

## 8. Conclusiones

Tras la realización de los ensayos previos de validación del sistema y la ejecución del tramo de prueba se puede afirmar que la viabilidad técnica de montaje y ejecución en obra ha sido demostrada con el tramo de prueba realizada en el tramo II, Campus de Salud de la Línea Metropolitana 1, de Metro Ligero de Granada, implicando esta actuación un hito dentro del desarrollo de la tecnología ferroviaria y en concreto de los sistemas de vía en placa dentro de nuestro país.

El desarrollo futuro de esta tecnología con nuevas configuraciones y ampliando el rango de rigidez del sistema, abre la puerta para futuros proyectos de investigación donde se creen nuevas alternativas para sistemas de vía en placa que puedan ser utilizados tanto en el metro subterráneo, como el ferrocarril convencional y la alta velocidad.

## 9. Agradecimientos

Para concluir queríamos expresar nuestro agradecimiento a todas las entidades, así como su personal involucrado, que han permitido la realización de este tramo de prueba y que han sido imprescindibles para el desarrollo y buen fin de este proyecto:

Ferrocarriles Andaluces de la Junta de Andalucía (Administración Pública).

Oficina Técnica de Estudios y Control de Obras, S.A (Dirección de Obra)

Delegación de Andalucía de ACCIONA Infraestructuras (Constructora).

Hormigones Asfálticos Andaluces, S.A (Constructora)

Signus Ecovalor (Entidad Gestora de neumáticos fuera de uso).

## 10. Referencias bibliográficas.

De los tranvías a los Metros Ligeros en la Comunidad de Madrid. Madrid: Consejería de transportes e infraestructuras, (MINTRA, Madrid, Infraestructuras del Transporte), Consorcio Regional de Transportes de Madrid, con la colaboración de Metro de Madrid. 2008. 436 p.: il. col. ISBN: 978-84-451-3177-0

Especificación de vía “Fabricación, homologación, suministro y recepción de vía en placa con tacos prefabricados embebidos en elastómero (MM-EV-1-2-01) de Metro de Madrid.

Modern Railway Track. Second Edition (2001).Coenraad Esveld. Delft University.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2003): “UNE-EN 13481-5. Requisitos de funcionamiento para los sistemas de sujeción. Parte 5: Sistemas de sujeción para vía en placa”.

Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical. Tesis Doctoral P. Fonseca Teixeira. Universidad Politécnica de Cataluña. Depósito Legal: B-34313-2005/84-689-2536-5

Harris C.M. Handbook of noise control. McGraw-Hill, 1957.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-1 (ISO 10846-1:1997). Medida en laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 1. Principios y líneas directrices.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-2 (ISO 10846-2:1997). Medida en laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 2. Rigidez dinámica de soportes elásticos para movimiento de translación, método directo.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-3 (ISO 10846-3:1997). Medida en laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 3. Método indirecto par la determinación de la rigidez dinámica de soportes elásticos en movimientos de translación



# SOBRE EL USO DE PARAPETOS SÓLIDOS PARA ATENUAR LOS EFECTOS DEL VIENTO TRANSVERSAL EN LA CIRCULACIÓN DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS

## ON THE USE OF SOLID PARAPETS TO ATTENUATE THE EFFECTS OF CROSS-WINDS ON TRAINS

José Meseguer Ruiz - j.meseguer@upm.es

Sergio Ávila Sánchez - s.avila@upm.es

Oscar López García - oscar.lopez.garcia@upm.es

IDR/UPM. E.T.S.I. aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid

Carlos Díez Arroyo - cdiez@adif.es

Agustín Fernández Sanz - afernandez@adif.es

José Conrado Martínez Acevedo - jcmartinez@adif.es

ADIF, España

**Resumen:** Cuando un tren de alta velocidad se desplaza por zonas expuestas a vientos laterales, como es el caso de los viaductos, los incrementos de las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre el vehículo por causa de la acción del viento, pueden ser determinantes para fijar los límites de operación del mismo, lo que puede aconsejar en algunos casos equipar la infraestructura ferroviaria con barreras cortavientos que disminuyan la acción del viento sobre los trenes. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en IDR/UPM (Instituto Universitario de Investigación “Ignacio Da Riva”, E.T.S.I. aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid), mediante ensayos con modelos a escala en un túnel aerodinámico, sobre el efecto de sistemas de protección frente a vientos laterales en las cargas aerodinámicas sobre un modelo bidimensional de coche de tren de alta velocidad; los sistemas de protección ensayados han sido parapetos sólidos verticales equipados con aleros en lo alto de los mismos.

**Palabras clave:** Alta velocidad, barreras cortavientos, cargas de viento, ensayos en túnel aerodinámico.

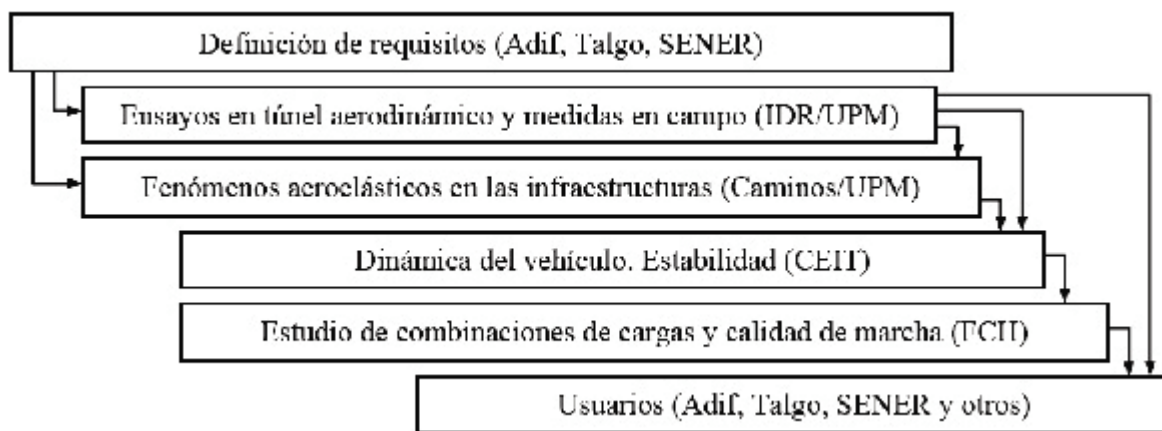
**Abstract:** When high-speed trains are subjected to high speed winds at exposed locations such as bridges, aerodynamic forces and moments acting on the vehicles become important, because lateral aerodynamic loads can cause the overturning of the vehicles, thence cross-wind effects must be taken into account to determine the limits of operation for high speed trains. A way to decrease the lateral wind loads acting on a vehicle under cross-winds is to reduce the wind effects by using windbreaks. In this paper experimental results of the effects of windbreaks on the wind loads on a train coach are presented. Results have been obtained at IDR/UPM (Instituto Universitario de Investigación “Ignacio Da Riva”, E.T.S.I. aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid) by wind tunnel testing of two-dimensional models. Tested windbreaks have been vertical parapets equipped with eaves at the top.

**Keywords:** High speed trains, windbreaks, wind loads, wind tunnel tests.

## 1. Introducción

Los resultados que se presentan en esta comunicación se enmarcan en el proyecto de referencia PT-2007-024-17CCPM, “Efectos del viento transversal sobre la circulación de vehículos ferroviarios. Determinación de valores límite”, financiado por el Ministerio de Fomento a través de Centro de Estudios y Experimentación para Obras Públicas (CEDEX), cuya finalidad, tal como se enuncia en su título, es evaluar los efectos del viento transversal sobre la circulación de vehículos ferroviarios para la determinación de valores límite de operación de los trenes de alta velocidad.

Para la ejecución de este proyecto ha sido formado un amplio equipo integrado por varios grupos pertenecientes a instituciones españolas. Dentro de este equipo, de acuerdo con el esquema de la figura 1, es tarea de Adif, Talgo y SENER la definición de requisitos relacionados con la infraestructura ferroviaria y con el material rodante, en la Universidad Politécnica de Madrid (Instituto Universitario de Investigación “Ignacio Da Riva”, IDR/UPM) recae la responsabilidad de coordinación del proyecto, así como la ejecución de los ensayos en túneles aerodinámicos relativos tanto a infraestructuras como a material rodante, y también las medidas en campo; es tarea del grupo de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la misma Universidad el análisis de los fenómenos aeroelásticos en las infraestructuras; el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipuzcoa (CEIT) es responsable del estudio de la dinámica del vehículo y su estabilidad; y la Fundación Caminos de Hierro (FCH) del análisis de combinaciones de cargas y calidad de marcha.



**Fig. 1. Organigrama del proyecto PT-2007-024-17CCPM, “Efectos del viento transversal sobre la circulación de vehículos ferroviarios. Determinación de valores límite”**

El objetivo trazado en este proyecto generar información sobre sistemas de protección pasiva para trenes de alta velocidad sometidos a vientos cruzados, evaluar el impacto de tales sistemas en la catenaria ante vientos laterales, profundizar en el análisis de las inestabilidades aeroelásticas que afectan a las infraestructuras (principalmente cargas de bataneo en viaductos), evaluar el efecto del viento lateral sobre la dinámica del tren, y de la combinación de la acción del viento con otras acciones ferroviarias mejorar el análisis de la seguridad y de la calidad de marcha.

En lo que sigue se presentan algunos de los resultados obtenidos hasta la fecha en IDR/UPM mediante ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos dentro de este proyecto; de acuerdo con este horizonte, la presentación de resultados queda limitada a aquellos relativos a las cargas de

viento sobre modelos de unidades de tren de alta velocidad sobre viaductos equipados con diversos tipos de barreras cortavientos.

En el apartado siguiente se presenta una revisión, necesariamente breve, del estado del conocimiento sobre el tema, los resultados experimentales han sido obtenidos en el túnel A4C de IDR/UPM, cuyas características más sobresalientes se describen en el apartado tercero, al igual que las de los diferentes modelos empleados en los ensayos. Y por último en el apartado cuarto se muestran los resultados medidos, en primer lugar se recogen las medidas de las distribuciones de presión sobre un modelo de coche de tren situado sobre un viaducto, sin y con barreras cortavientos, y después las cargas globales de viento sobre el modelo de coche de viaducto bajo las diversas condiciones de protección frente a viento lateral consideradas.

## 2. Antecedentes

Sabido es que el viento cruzado sobre cualquier vehículo produce una fuerza lateral y un momento de balanceo que tienden a desplazar al vehículo lateralmente y a provocar su vuelco. En el caso de un tren la fuerza lateral puede dar lugar incluso al desplazamiento de las vías (ripado), y respecto al par de vuelco, este término se ha ido convirtiendo con el tiempo en un factor potencialmente más peligroso conforme ha ido disminuyendo el peso de los trenes. Obviamente la posibilidad de vuelco es mayor cuanto menor es el ancho de vía, siendo un tema que ha preocupado a las autoridades ferroviarias, incluidas las españolas. El tema también es de gran interés para los fabricantes de material ferroviario rodante, algunos de los cuales incluyen de forma sistemática campañas de ensayos en túneles aerodinámicos a fin de determinar experimentalmente las fuerzas aerodinámicas sobre cabezas tractoras y otras unidades de tren.

Así pues, cada vez resulta más necesario tener en cuenta la aerodinámica en el diseño y consecuentemente en el cálculo de las fuerzas que actúan sobre el tren (Johnson 1996, Matschke & Schulte-Werning 1997, Schetz 2001; Imai y otros 2002; Raghunathan y otros 2002; Gautier 2003; Mancini 2003; Andersson y otros 2004).

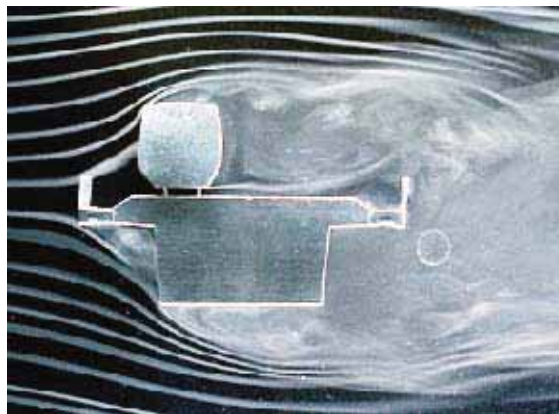
Cuando un tren de alta velocidad se desplaza por zonas expuestas a vientos, como puentes en terreno accidentado o terraplenes en campo abierto, los incrementos de las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre el vehículo por causa de la acción del viento, pueden ser importantes respecto a las fuerzas y momentos aerodinámicos que tienen lugar sobre un terreno llano. Este problema ha despertado el interés de la comunidad científico-tecnológica, existiendo al respecto un número razonable de trabajos publicados donde se aborda la determinación de las cargas aerodinámicas en trenes expuestos a vientos laterales mediante ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos (Baker 1986; Baker & Humphreys 1996; Willemsen 1997; Kwon y otros 2001; Hyeok-Bin y otros 2003; Suzuki y otros 2003; Sanquer y otros 2004; Barcala & Meseguer 2007), con medidas en trenes reales (Matschke y otros 2002; Matschke & Heine 2002; Ding y otros 2005) o con métodos numéricos (Khier y otros 2000; Bettle y otros 2003; Myung-Kwan y otros 2003; Diedrichs, 2003, 2008).

Conviene aclarar que, hoy por hoy, la mayoría de la información disponible proviene de ensayos hechos con modelos a escala de trenes e infraestructuras en túneles aerodinámicos, generalmente realizados con aproximaciones estáticas donde la interacción entre el aire y el tren se reproduce por medio de modelos estáticos expuestos a la acción del flujo de aire del túnel. Obviamente este método no tiene en consideración el movimiento relativo del tren respecto al terreno. Aunque ha habido algunos intentos de mover el modelo a través del túnel aerodinámico (Baker 1986; Baker & Humphreys 1996; Baker y otros 2001) o desplazar una banda simulando el movimiento del terreno

respecto al tren (Kwon y otros 2001), el método utilizado mayoritariamente consiste en fijar el modelo de tren en la cámara de ensayos, sin considerar el movimiento relativo con el suelo.

Paralelamente al trabajo experimental, y potenciado sin duda por la cada vez mayor capacidad de cálculo de los ordenadores, se aprecia un crecimiento constante del esfuerzo dedicado al tratamiento numérico de la aerodinámica de trenes, donde además del viento lateral se han analizado diversos aspectos de la circulación de trenes en túneles, con especial énfasis en la influencia de la cabeza del tren en la aerodinámica (Takanobu & Kozo 1997; Baron y otros 2001; Chang-Hoon & Warn-Gyu 2003). Hay que mencionar que también se han realizado estudios instrumentando secciones de un túnel real para medir la temperatura, velocidad y presión del aire durante la operación rutinaria de una línea (Vardy & Reinke 1999), y de igual forma medidas en trenes instrumentados con tomas de presión (William-Louis & Tournier 2005; Martínez y otros 2008).

Hay que decir, sin embargo, que un problema todavía no resuelto numéricamente con precisión (ni con los métodos más avanzados actualmente disponibles para problemas con escalas similares es el de desprendimiento laminar de la capa límite y su posterior readherencia turbulenta. El desprendimiento prematuro de la capa límite tiene lugar cuando ésta se encuentra, cerca del punto de remanso donde inicia su desarrollo, con regiones donde la geometría del cuerpo cambia bruscamente, como ocurre cerca del borde de ataque de perfiles delgados o cerca de las aristas de barlovento de los cuerpos no fuselados (en este segundo caso el desprendimiento ocurre incluso aunque corriente arriba la capa límite sea turbulenta). El problema es de gran importancia en la industria aeronáutica, lo que motiva que se estén dedicando considerables recursos, sin que por el momento se vislumbre una solución plenamente satisfactoria. El mismo problema aparece en las estelas de cuerpos no fuselados cualquiera que sea su naturaleza, no existiendo en la actualidad método numérico alguno capaz de proporcionar valores fiables de la llamada presión de base (figura 2).



**Fig. 2. Fotografía obtenida en túnel de humos de un modelo bidimensional de vagón de tren sobre un viaducto. La visualización con humo, aunque únicamente de valor cualitativo (pues las técnicas de visualización normalmente exigen que el número de Reynolds sea pequeño), permite apreciar en toda su magnitud la gran complejidad del flujo debido a la existencia de una amplia estela turbulenta (de Barcala & Meseguer 2008).**

También se han realizado estudios en túnel aerodinámico del movimiento del aire producido por los trenes de alta velocidad en estaciones (Gerhardt & Krüger 1998), así como ciertos trabajos teóricos donde se determinan, con modelos analíticos de relativa sencillez pero de asombrosa exactitud, las cargas aerodinámicas sobre objetos de geometría simple ocasionadas por el paso de un vehículo (Sanz-Andrés & Santiago-Prowald 2000; Sanz-Andrés y otros 2003; Sanz-Andrés y otros 2004).

Las cargas aerodinámicas sobre las unidades del tren se ven indudablemente reducidas con la colocación de parapetos que producen una modificación del campo de presiones sobre el tren, lo que afecta tanto a la fuerza lateral como al momento de vuelco. El uso de parapetos para protección de las acciones del viento es un tema bien conocido en IDR/UPM, donde se tiene una contrastada experiencia que se inicia en los años setenta (Da Riva y otros 1970, 1971) con barreras para aplicaciones en agricultura, que posteriormente ha derivado hacia otras aplicaciones específicas, relativas a entornos de puertos y minas (Sanz-Andrés y otros, 2002; Santiago y otros, 2007), la protección de trenes (Barcala & Meseguer 2007), y la protección de cubiertas y tejados en edificaciones (Pindado & Meseguer, 2003; Pindado y otros, 2004; Franchini y otros, 2005).

### 3. Definición de la instalación y de los modelos de ensayos

Los ensayos aerodinámicos que se describen en este artículo han sido llevados a cabo en el túnel A4C de IDR/UPM. Este túnel es de corriente aspirada, cámara de ensayos cerrada y circuito abierto. El túnel ha sido diseñado para cumplir los requisitos de ensayos de cuerpos bidimensionales.

Según se puede apreciar en la figura 3-A, en el sentido de la corriente los elementos del túnel A4C son: contracción (1), cámara de ensayos (2), difusor (3) y ventiladores (4). El túnel A4C está impulsado por cuatro ventiladores centrífugos, cuya potencia total es de 30 kW, dispuestos en dos torres con dos ventiladores cada una (véase también la figura 3-B). Los ventiladores descargan en el recinto donde se encuentra el túnel (5), que actúa como conducto de retorno (para ello el contorno exterior del túnel está convenientemente carenado).

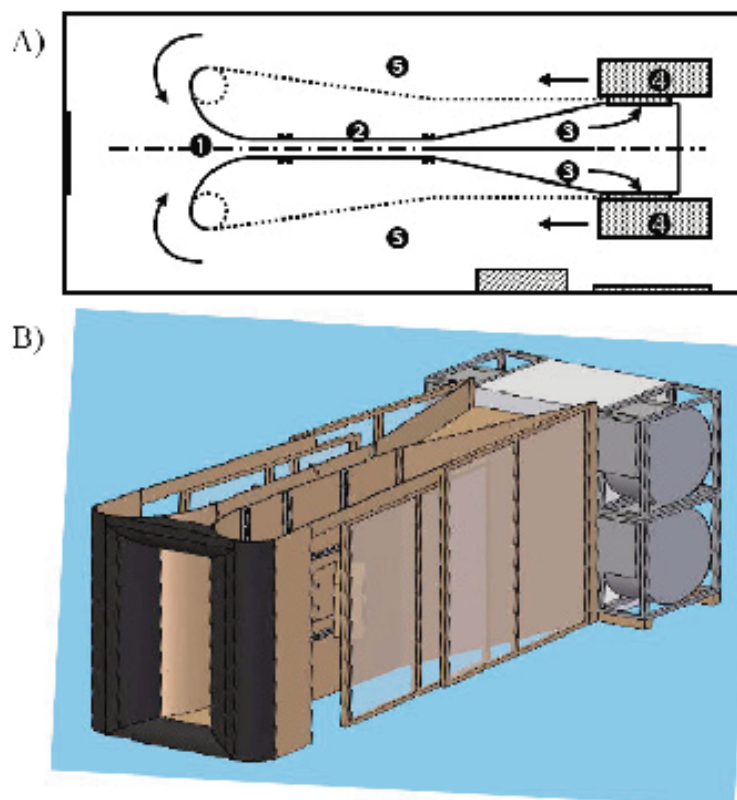


Fig. 3. A) esquema de la planta del túnel A4C (para la identificación de las diferentes partes véase el texto), y B) vista esquemática del túnel.

La contracción es bidimensional, con un único plano de contracción (el techo y el suelo de la contracción y de la cámara de ensayos son paralelos entre sí). La cámara de ensayos es de sección rectangular, de 0.2 m de ancho y 1.8 m de alto, con una longitud de 1.8 m. El difusor de adaptación a los ventiladores está dividido internamente en dos conductos, pues de otra forma su longitud tendría que ser mucho mayor para no superar la limitación del ángulo de apertura del conducto, evitando así el desprendimiento de las capas límite en las paredes verticales del difusor.

Para definir los modelos de ensayos se han tomado como referencia la información suministrada por Adif y por los fabricantes de material rodante. Todos los modelos de ensayos han sido construidos a escala 1/50, y en lo que sigue, cuando se proporcionan dimensiones geométricas éstas se refieren a los modelos de ensayos, en el entendimiento de que con la escala elegida el paso a las magnitudes reales es sencillo e inmediato. Los modelos son bidimensionales, con una longitud en la dirección perpendicular a la de la corriente incidente próxima al ancho de la cámara de ensayos del túnel (0.20 m).

Para definir los modelos de viaducto se han considerado las secciones de diferentes viaductos proporcionadas por Adif (los de los ríos Lamas, Podos, Ulla, Deza y Barbantiño). A partir de éstas secciones se han definido los modelos de tablero que se muestran en la figura 4, siendo la única diferencia entre ambos la altura del cajón inferior: 6 cm en un modelo (P) y 8 cm en otro (M). Al canto del cajón hay que añadir el espesor del tablero, 0.5 cm, de modo que el canto de los viaductos P y M, sin balasto, es  $b_P = 6.5$  cm y  $b_M = 8.5$  cm respectivamente (correspondiente en la realidad a 3.25 m y 4.25 m). En todos los casos la anchura o cuerda del tablero, sin barreras, es  $c = 28$  cm (14 m en la realidad). Sobre cada tablero se dispone el modelo de balasto (el mismo para los dos modelos de tablero) y sobre éste el modelo de coche (véase la figura 8).

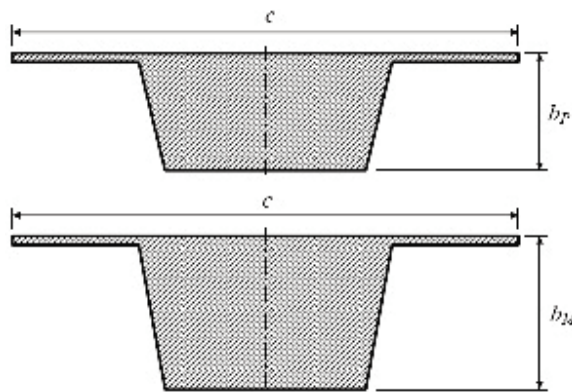


Fig. 4. Secciones de los modelos de viaducto empleados en los ensayos ( $c = 28$  cm,  $b_P = 6.5$  cm y  $b_M = 8.5$  cm).

Respecto a las barreras de protección contra el viento, en la figura 5 se muestra esquemáticamente una de ellas; cada barrera está formada por un andén (1), que sirve de elemento de unión con el tablero del puente (2), que soporta el deflector inferior (3) y el paramento vertical de la barrera (4), sobre el que sobresale el alero (5). De acuerdo con este esquema las barreras quedan caracterizadas por la altura  $h$  y el ancho del alero,  $a$ .

Se han construido dos modelos de coche de tren, uno con tomas de presión y otro sin tomas. El modelo de coche con tomas está provisto de cuarenta y ocho tomas de presión distribuidas de modo uniforme en la periferia, en secciones próximas a la media (figura 6). A partir de las distribuciones, integrando las cargas a lo largo del contorno del coche se determinan los coeficientes de fuerzas (sustentación y resistencia) y el coeficiente de par de vuelco.

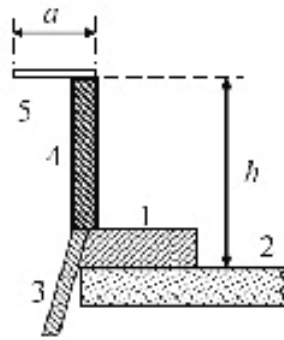


Fig. 5. Elementos y parámetros que definen la geometría de las barreras cortavientos.

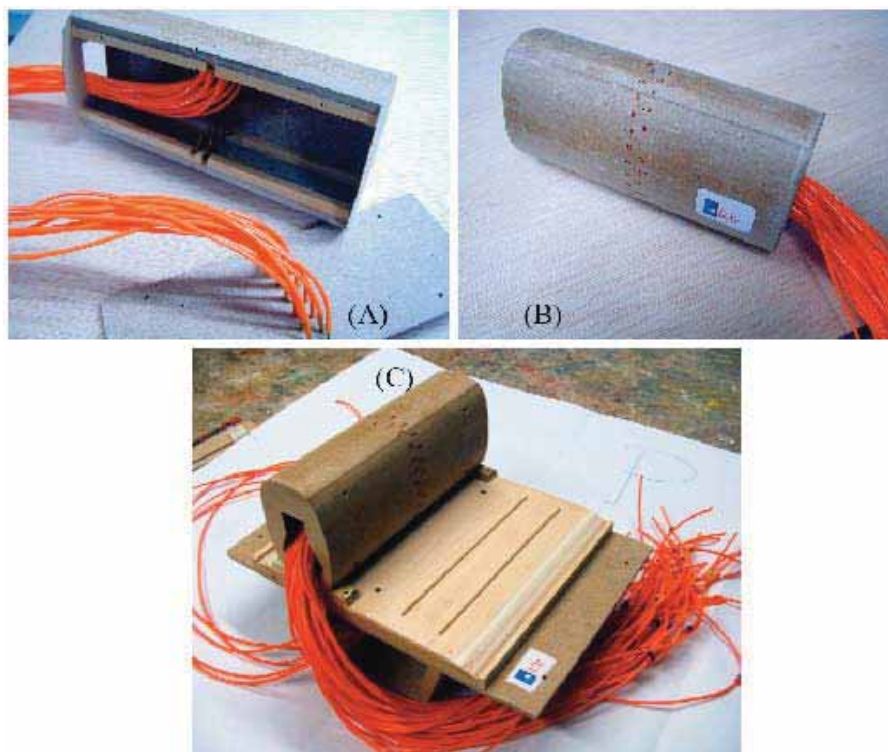
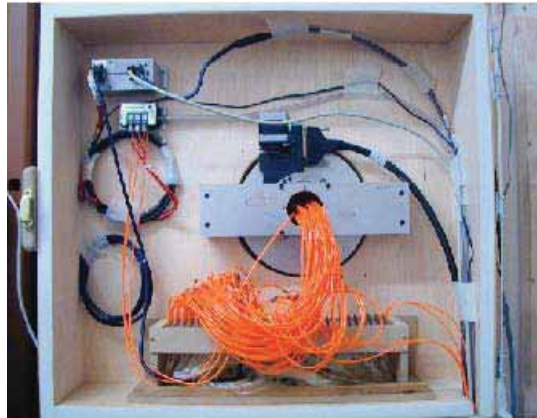


Fig. 6. Vista del modelo bidimensional de medida de presiones donde se pueden apreciar las tomas de presión y los conductos para transmisión de las señales neumáticas (A), vista del modelo listo para las medidas (B) y conjunto de viaducto (sin barreras cortavientos), balasto y coche con tomas de presión (C).

#### 4. Resultados de los ensayos de medida de presiones

En los ensayos de medida de presiones el conjunto formado por viaducto, balasto y coche de tren (figura 6) se monta sobre la plataforma giratoria existente en una de las paredes laterales de la cámara de ensayos del túnel A4C. La plataforma giratoria está unida a un sistema de giro Newport controlable mediante un ordenador, y través de la misma salen de la cámara de ensayos los tubos neumáticos que conducen las señales de presión al instrumento de medida de presiones, un lector multicanal controlado por el mismo ordenador personal que el sistema de giro (figura 7).



**Fig. 7. Instrumentación para la medida de presiones sobre el modelo de coche de tren.**

El lector de presiones, de Scanivalve Corp., tiene 126 entradas más una toma de referencia, lo que permite leer simultáneamente 63 entradas en un primer paso y otras 63 inmediatamente después, en un segundo paso (aunque en estos ensayos tan sólo se han leído cuarenta y ocho tomas de presión, que son las instaladas en el modelo de coche). La instalación de ensayos se completa con un tubo Pitot, Airflow modelo 3.3.311, situado cerca del techo de la cámara de ensayos, donde se miden la presión de remanso en la cámara de ensayos del túnel,  $p_0$ , y la presión estática de referencia,  $p_\infty$ , lo que permite, por diferencia de ambas, conocer el valor de la presión dinámica empleada para adimensionalizar los resultados:

$$(1) \quad p_0 - p_\infty = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$$

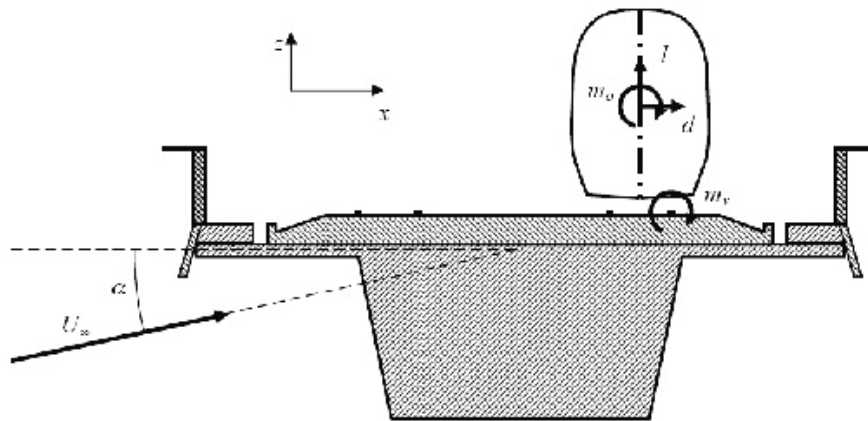
donde  $\rho$  es la densidad del aire y  $U_\infty$  su velocidad. Si es  $p_i$  la presión medida en una cierta toma  $i$ , el coeficiente de presión se define como

$$(2) \quad c_{p,i} = \frac{p_i - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$$

La instrumentación queda dentro de una caja que hace de puerta de la cámara de ensayos, de modo que en una de las paredes de la caja (la que coincide con la cámara de ensayos) se tiene a un lado el modelo de ensayos y al otro el sistema de medida. De este modo, en una secuencia de ensayo típica se abre la cámara de ensayos, lo que permite acceder al modelo e instalar la barrera cortavientos a ensayar, después se cierra la cámara y se inicia la sesión de medida, totalmente controlada por el ordenador de control que fija el primer valor del ángulo de ataque del conjunto y da la orden de lectura de presiones y de almacenamiento de los datos medidos, a continuación se fija el segundo valor del ángulo de ataque y la medida y almacenamiento correspondientes y así sucesivamente.

Han sido ensayados dieciséis modelos de barreras cortavientos, correspondientes a cuatro valores de la altura del paramento vertical,  $h = 25$  mm, 35 mm, 45 mm y 55 mm, y cuatro valores de la longitud del alero,  $a = 0$  mm, 5 mm, 10 mm y 15 mm, más el caso de referencias de viaducto sin barrera cortavientos alguna. En estos ensayos tan sólo ha sido considerado el modelo de puente de canto

pequeño,  $b_p=65$  mm, aunque sí se han considerado las dos posibles posiciones del coche de tren, según esté en la vía de barlovento o en la de sotavento. En cada configuración de ensayo se han tomado medidas para cinco valores del ángulo de ataque,  $\alpha$ , de  $-6^\circ$  a  $6^\circ$  en saltos de  $3^\circ$ , correspondiendo el caso  $\alpha = 0^\circ$  a la situación en la que la corriente incide paralelamente al plano del tablero; un ángulo de ataque positivo indica que con relación al viento incidente el extremo de barlovento del tablero está levantado respecto al extremo de sotavento (figura 8).



**Fig. 8. Definición de ángulo de ataque y sistema de cargas aerodinámicas sobre el coche de tren: sustentación,  $l$ , resistencia aerodinámica,  $d$ , momento de cabeceo del coche,  $m_o$ , y momento de vuelco,  $m_v$ .**

Conocidas las distribuciones de coeficiente de presión correspondientes a cada ángulo de ataque, las cargas por unidad de longitud de coche se obtienen integrando las presiones a lo largo del contorno, es decir

$$(3) \quad d = -\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \oint c_p(x, z) \mathbf{n} \cdot \mathbf{i} ds = -\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \int c_p(x, z) dz,$$

$$(4) \quad l = -\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \oint c_p(x, z) \mathbf{n} \cdot \mathbf{k} ds = -\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \int c_p(x, z) dx,$$

$$m_o = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \left( -\int z c_p(x, z) \mathbf{n} \cdot \mathbf{i} ds + \int x c_p(x, z) \mathbf{n} \cdot \mathbf{k} ds \right) =$$

$$(5) \quad = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \left( -\int z c_p(x, z) dz + \int x c_p(x, z) dx \right),$$

$$(6) \quad m_v = m_o + d h_o + \frac{1}{2} l t,$$

donde  $d$  es la resistencia aerodinámica,  $l$  la fuerza de sustentación,  $m_o$  el momento de cabeceo (medido respecto al punto medio del coche) y  $m_v$ , y momento de vuelco, todos ellos por unidad de longitud;  $\mathbf{n}$  representa la normal al contorno del vehículo,  $\mathbf{i}$  y  $\mathbf{k}$  son los versores según los ejes del

sistema de coordenadas empleado,  $ds$  es el diferencial de longitud sobre el contorno,  $h_0$  la distancia vertical desde el punto medio del coche a la superficie superior de la vía y  $t$  el ancho de vía. Si son  $h_c$  y  $c_c$  la altura y el ancho del coche, los coeficientes de fuerzas y de momentos están definidos como

$$(7) \quad c_d = \frac{d}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 h_c},$$

$$(8) \quad c_l = \frac{l}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 h_c},$$

$$(9) \quad c_{mv} = \frac{m_v}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 h_c c_c}.$$

Las distribuciones de presión medidas en cada ensayo quedan identificadas por una clave de letras y números, de modo que una primera letra que indica el tipo de tablero (en los resultados que se presentan en este artículo es siempre “P”, de tablero de canto pequeño, por lo que esta letra se ha omitido en las etiquetas de los resultados), un número de dos cifras precedido de la letra “h” indica la altura de la barrera en milímetros, otro grupo formado también por un número de dos cifras precedido de la letra “a” indica la anchura del alero en milímetros, y finalmente una letra mayúscula proporciona la información sobre la posición del coche, bien sobre la vía de barlovento (“B”) o sobre la de sotavento (“S”).

En las figuras 9, 10, 11 y 12 se muestran las distribuciones de presión correspondientes a algunos casos típicos. De la integración de las distribuciones de presión se obtienen los coeficientes de fuerzas y de momento que se muestran en forma gráfica en las figuras 13, 14 y 15, donde se han representado, en función del ángulo de ataque  $\delta_j$ , los coeficientes reducidos  $\alpha$ , o cocientes entre el coeficiente de carga aerodinámica correspondiente a la barrera de altura  $h$  y el coeficiente de la configuración de referencia, que es la de viaducto sin barreras ( $h = 0$ ), es decir

$$\delta_d(h) = c_d(h)/c_d(0), \delta_l(h) = c_l(h)/c_l(0), \text{ y } \delta_{mv}(h) = c_{mv}(h)/c_{mv}(0)$$

Como se puede apreciar en los gráficos, salvo en el caso de la fuerza de sustentación los coeficientes reducidos disminuyen al aumentar el ángulo de ataque, como era de esperar, pues al aumentar el ángulo de ataque la barrera cortavientos protege cada vez más al modelo de coche; esto es así en el caso de la fuerza de resistencia y en el del momento de vuelco (donde el efecto de la resistencia aerodinámica es dominante).

En el caso de la sustentación, si el coche está en la vía de barlovento los coeficientes aumentan con el ángulo de ataque, salvo si la altura de la barrera es muy elevada. La razón de este comportamiento es que la corriente que incide sobre el tren está muy acelerada por la presencia de la barrera, lo que origina la aparición de un pico de succión muy intenso en la parte del techo del coche (véanse también las figuras 9 a 12). Finalmente, en las figuras 16, 17 y 18 se presenta la variación con la altura  $h$  de los coeficientes de carga reducidos

$$\delta_d(h) = c_d(h)/c_d(0), \delta_l(h) = c_l(h)/c_l(0), \text{ y } \delta_m(h) = c_m(h)/c_m(0)$$

correspondientes al caso  $\alpha = 0^\circ$ . Nótese que en cuanto al coeficiente de resistencia aerodinámica y al de momento de vuelco se refiere la colocación de barreras significa una mejora muy destacable, siendo la influencia de la anchura del alero menos significativa.

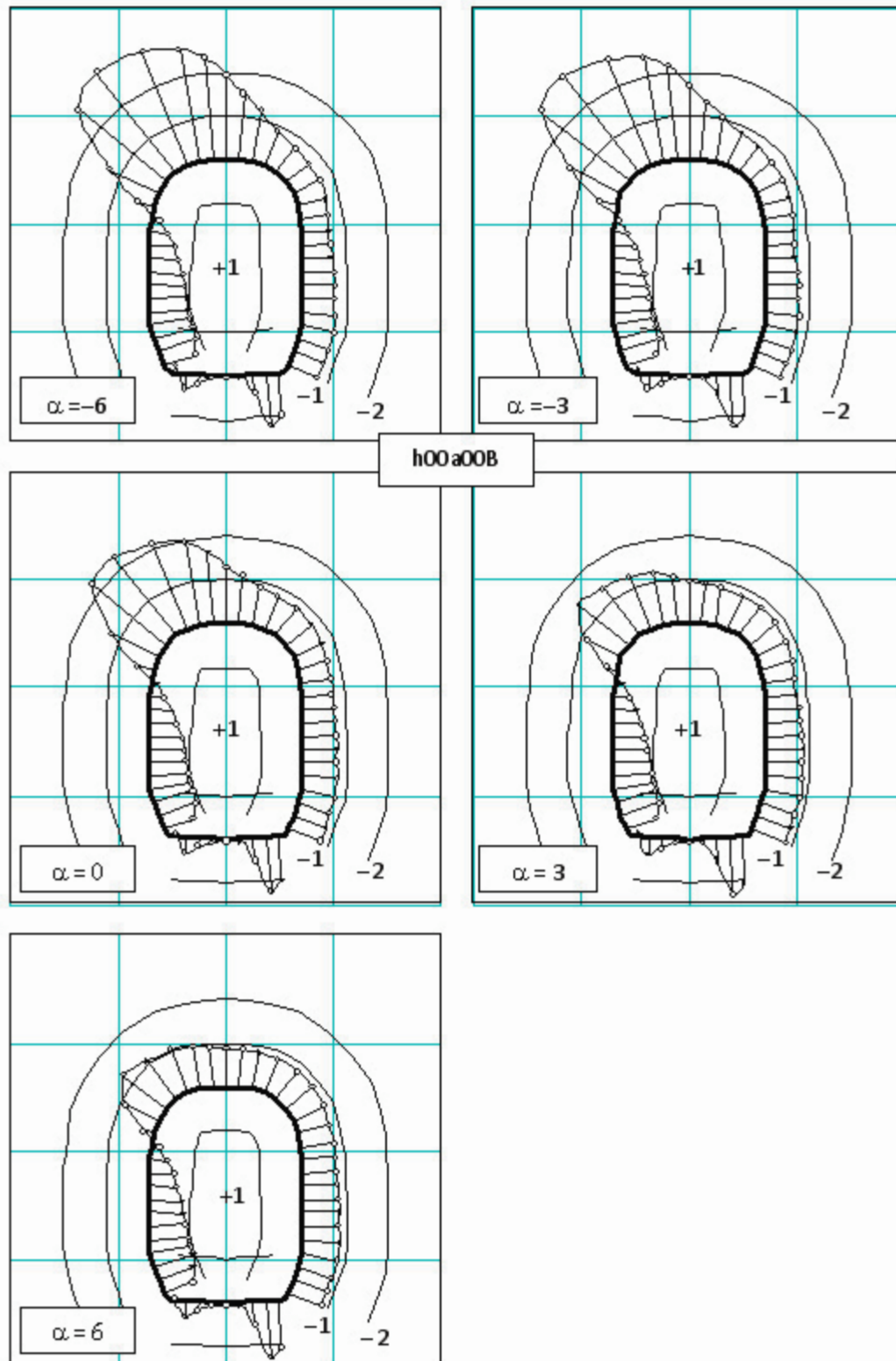
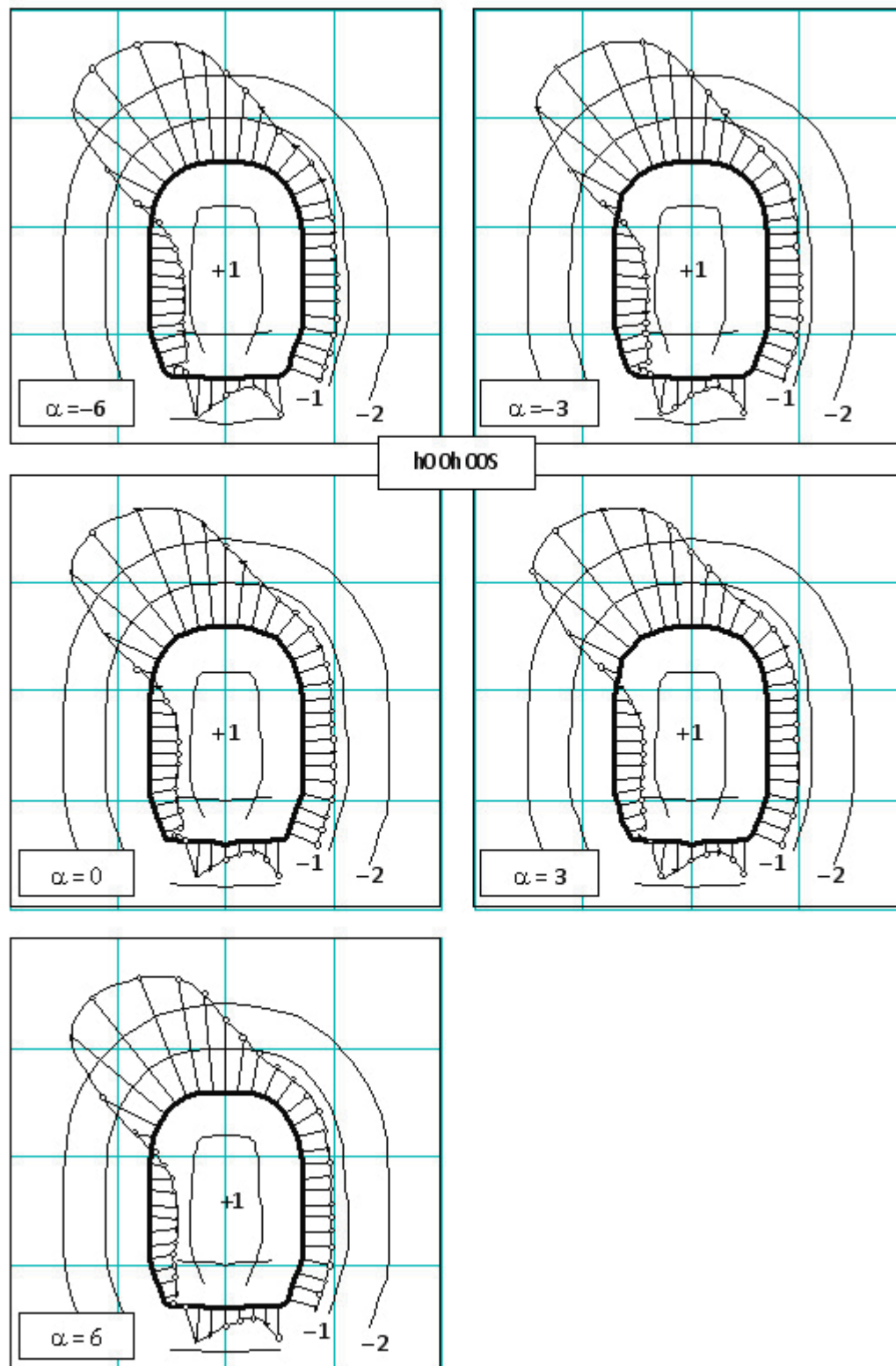


Fig. 9. Distribuciones de presión para distintos ángulos de ataque medidas en el caso de coche a barlovento, sin barreras cortavientos sobre el tablero del viaducto (configuración h00a00B)



**Fig. 10. Distribuciones de presión para distintos ángulos de ataque medidas en el caso de coche a sotavento, sin barreras cortavientos sobre el tablero del viaducto (configuración h00a00S)**

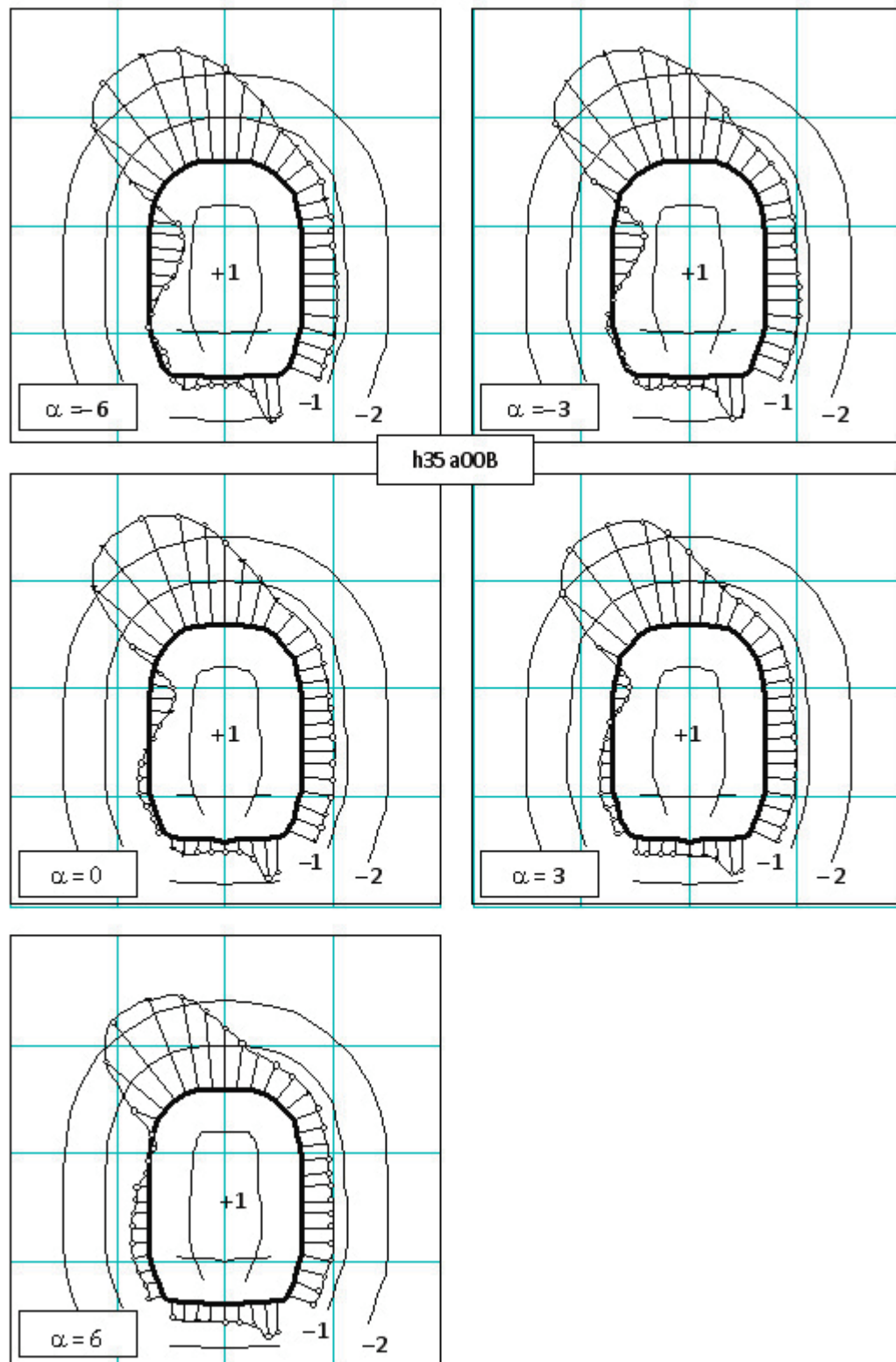


Fig. 11. Distribuciones de presión para distintos ángulos de ataque medidas en el caso de coche a barlovento, con una barrera cortaviento de altura  $h = 35$  mm, sin alero,  $a = 0$  (configuración h35a00B)

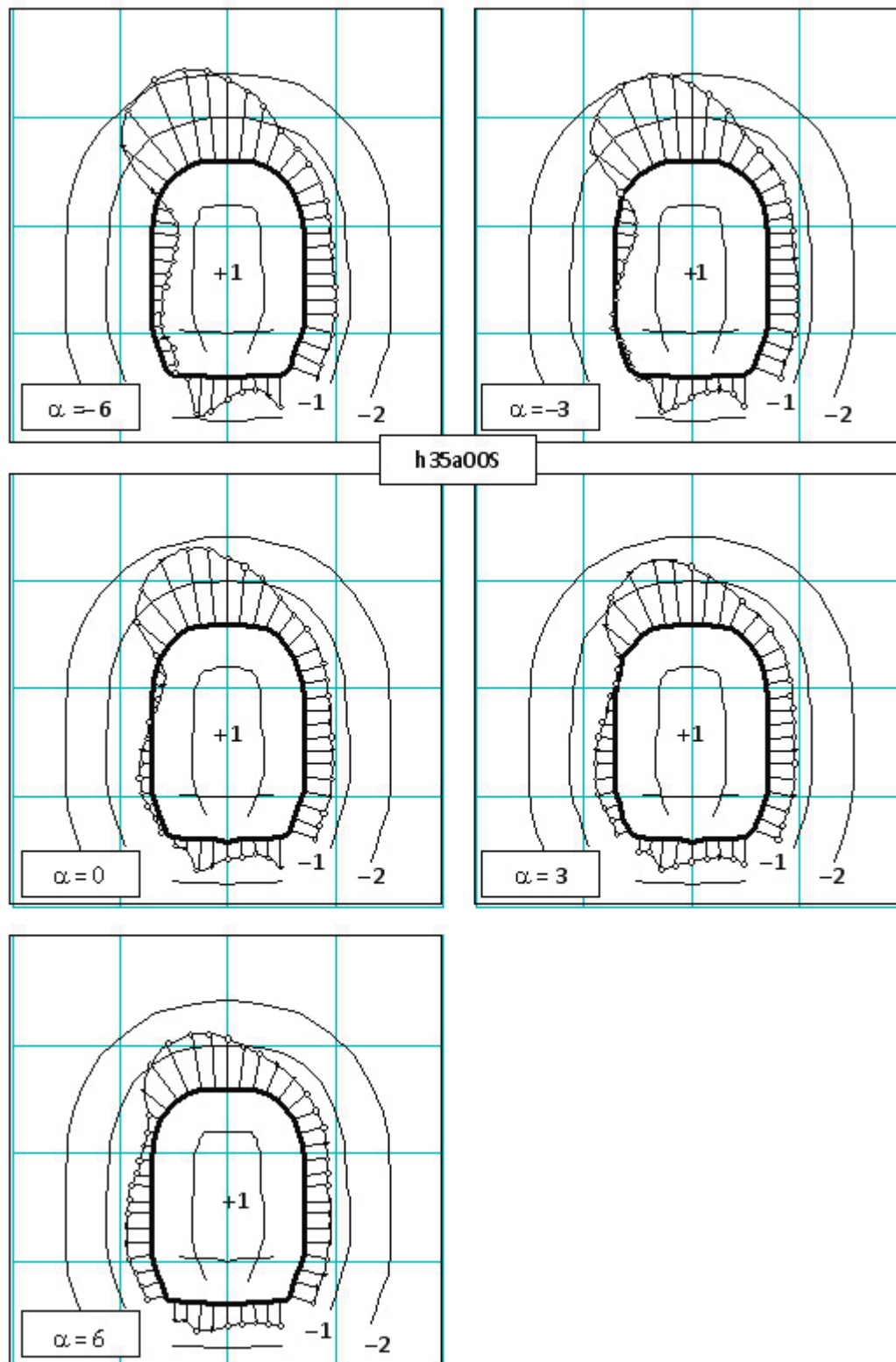


Fig. 12. Distribuciones de presión para distintos ángulos de ataque medidas en el caso de coche a sotavento, con una barrera cortaviento de altura  $h = 35$  mm, sin alero,  $a = 0$  (configuración h35a00S)

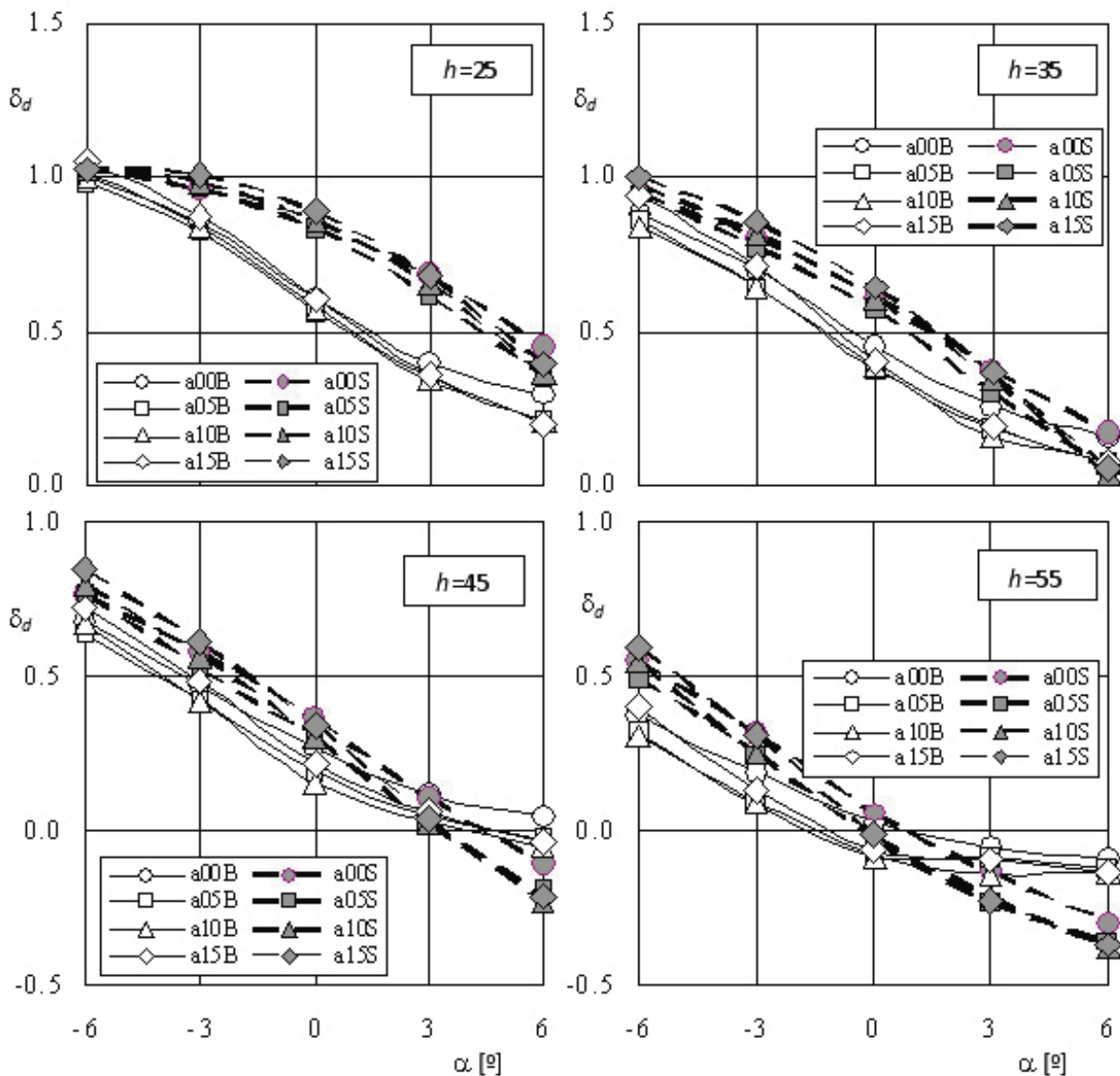


Fig. 13. Variación con el ángulo de ataque  $\alpha$ , del cociente  $\delta_d = c_d(h)/c_d(0)$ , donde  $c_d(h)$  es el coeficiente de resistencia aerodinámica correspondiente a la barrera de altura  $h$  y  $c_d(0)$  el coeficiente de referencia correspondiente al viaducto sin barreras ( $h$  ero de la barrera de acuerdo con la leyenda incluida en las figuras. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento. Al comparar los resultados para diferentes alturas de barrera, nótese que las escalas verticales no son las mismas en todas gráficas.

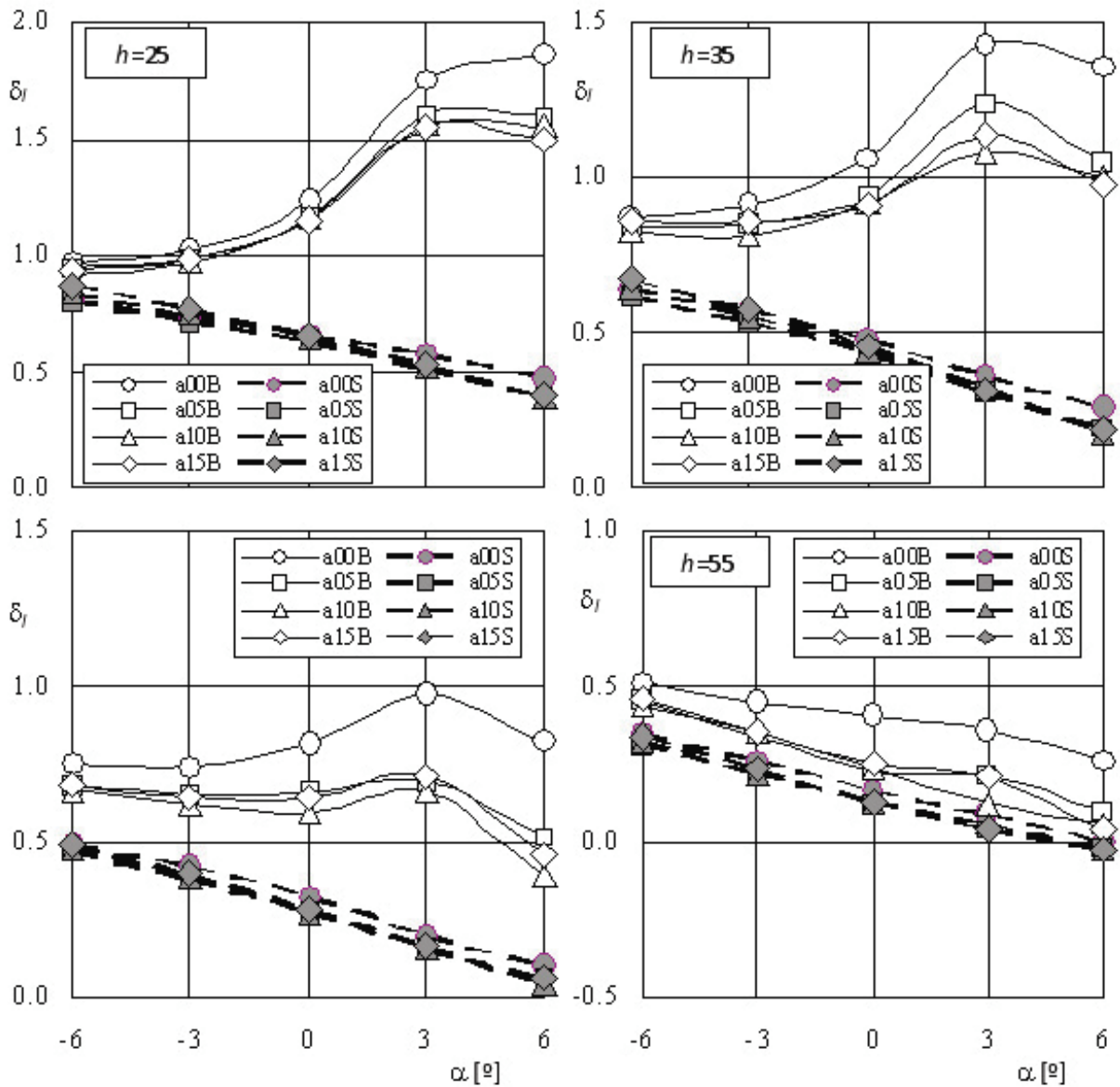


Fig. 14. Variación con el ángulo de ataque  $\alpha$ , del cociente  $\delta_\gamma = c_f(h)/c_f(0)$ , donde  $c_f(h)$  es el coeficiente de sustentación correspondiente a la barrera de altura  $h$  y  $c_f(0)$  el coeficiente de referencia correspondiente al viaducto sin barreras ( $h$  de acuerdo con la leyenda incluida en las figuras. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento. Al comparar los resultados para diferentes alturas de barrera, nótese que las escalas verticales no son las mismas en todas gráficas.

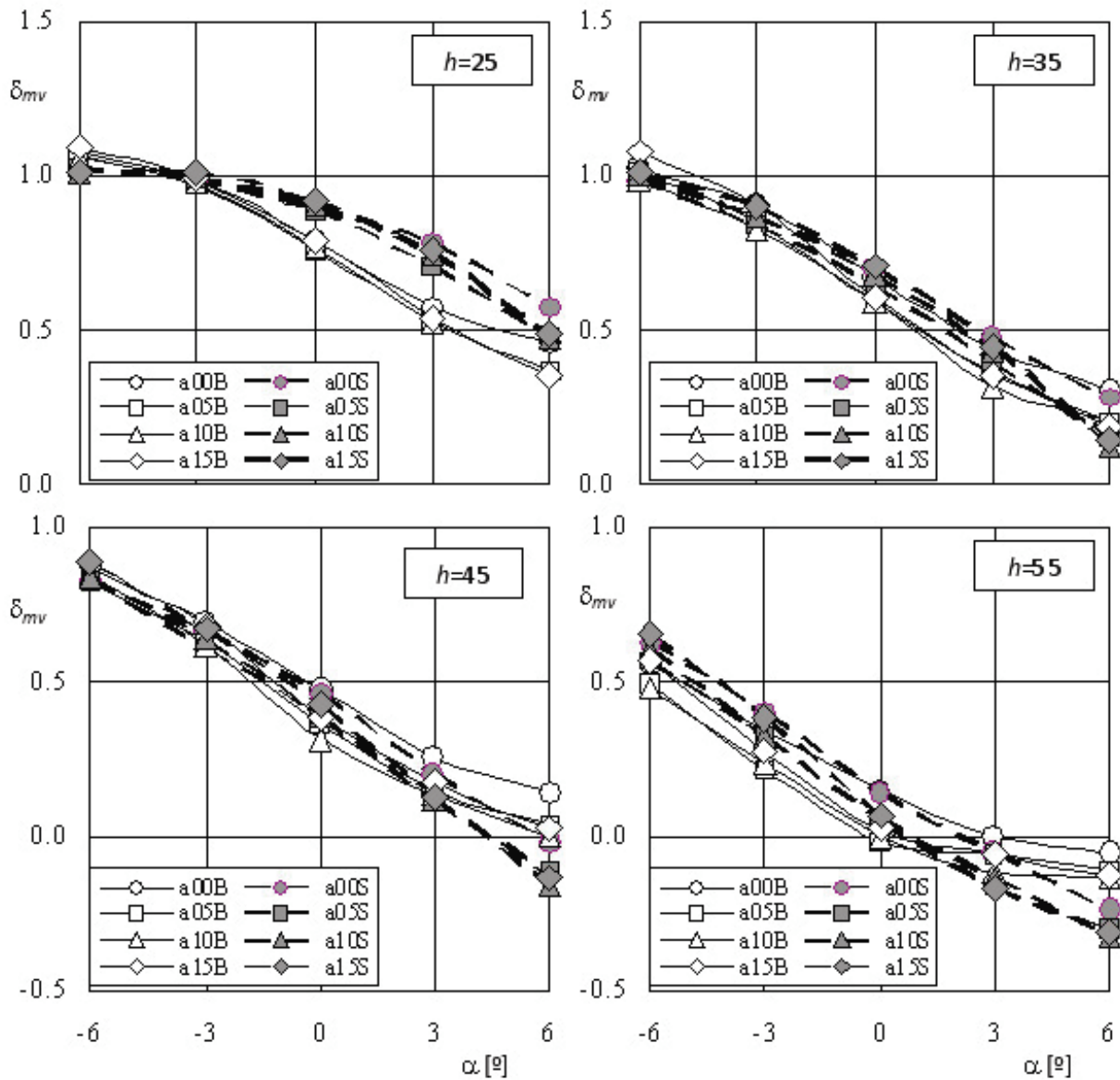


Fig. 15. Variación con el ángulo de ataque  $\alpha$ , del cociente  $\delta_{mv} = c_{mv}(h)/c_{mv}(0)$ , donde  $c_{mv}(h)$  es el coeficiente de momento de vuelco correspondiente a la barrera de altura  $h$  y  $c_{mv}(0)$  el coeficiente de referencia correspondiente al viaducto sin barreras ( $h$  a barrera de acuerdo con la leyenda incluida en las figuras. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento. Al comparar los resultados para diferentes alturas de barrera, nótese que las escalas verticales no son las mismas en todas gráficas.

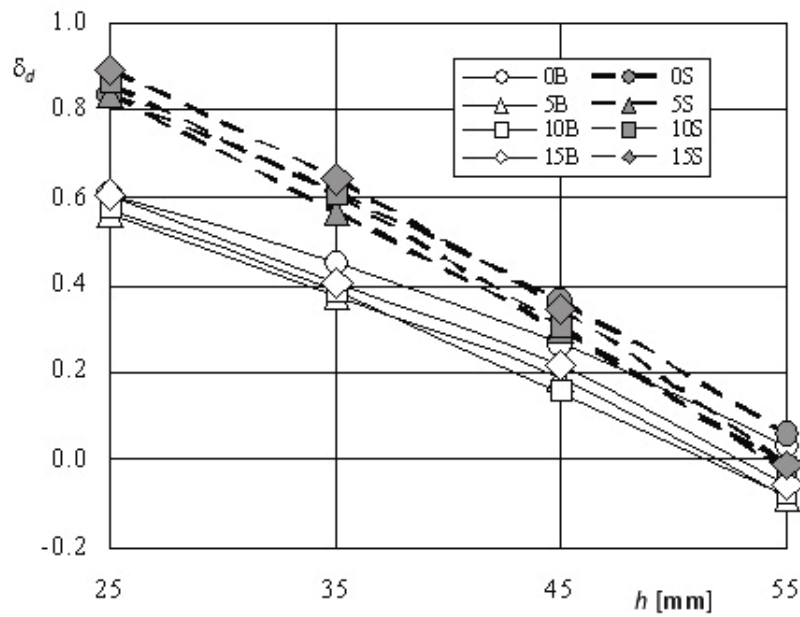


Fig. 16. Variación con la altura de la barrera,  $h$ , del cociente  $\delta_d = c_d(h)/c_d(0)$  en el caso de ángulo de ataque nulo. Los símbolos identifican el alero de la barrera de acuerdo con la leyenda incluida en la figura. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento.

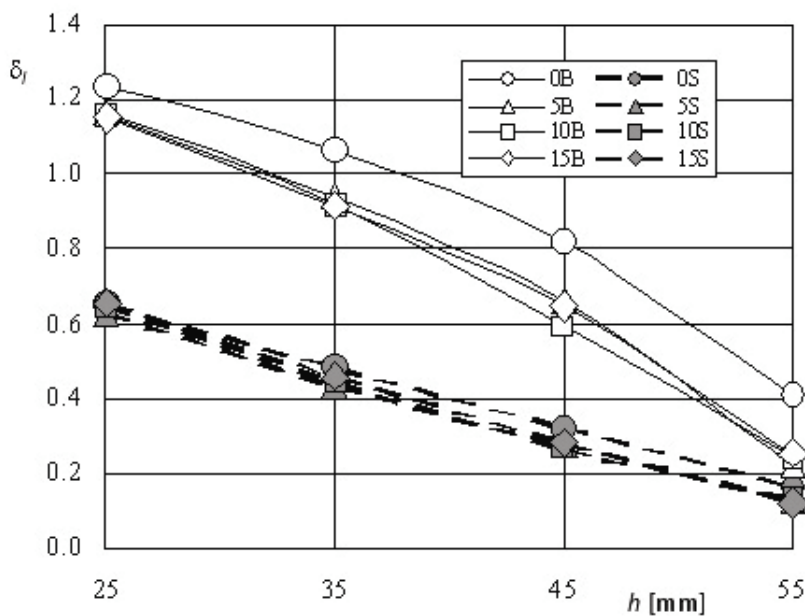


Fig. 17. Variación con la altura de la barrera,  $h$ , del cociente  $\delta_l = c_l(h)/c_l(0)$  en el caso de ángulo de ataque nulo. Los símbolos identifican el alero de la barrera de acuerdo con la leyenda incluida en la figura. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento.

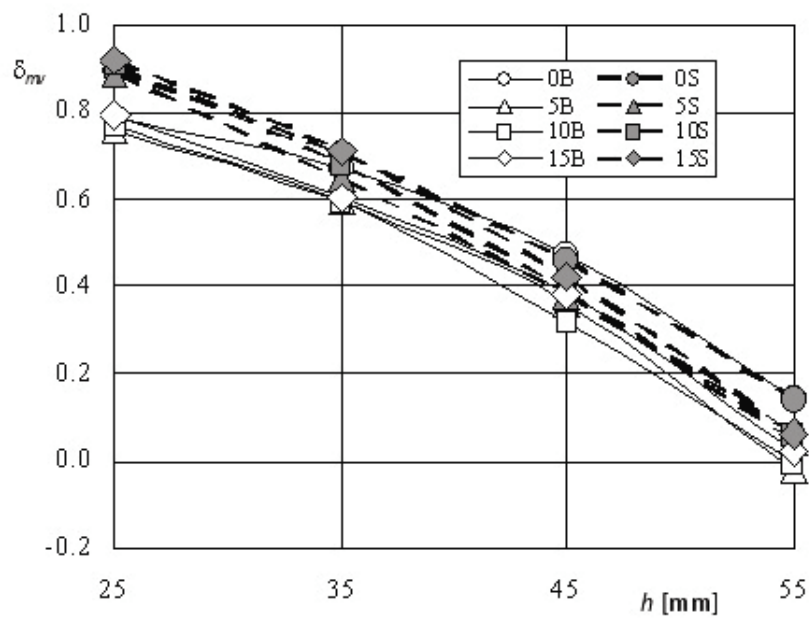


Fig. 18. Variación con la altura de la barrera,  $h$ , del cociente  $\delta_{mv} = c_{mv}(h)/c_{mv}(0)$  en el caso de ángulo de ataque nulo. Los símbolos identifican el alero de la barrera de acuerdo con la leyenda incluida en la figura. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento.

## **Bibliografía**

Andersson, E., Häggström, J., Sima, M., & Stichel, S., Assessment of train-overturning risk due to strong cross-winds, *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit*, 218, 213-223 (2004).

Baker, C.J. & Humphreys, N.D., Assessment on the adequacy of various wind tunnel techniques to obtain aerodynamic data for ground vehicles in cross winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 60, 49-68 (1996).

Baker, C.J., Dalley, S.J., Johnson, T., Quinn, A. & Wright, N.G., The slipstream and wake of a high-speed train, *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit*, 215, 83-99 (2001).

Baker, C.J., Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 24, 227-251 (1986).

Barcala, M.A. & Meseguer J. An experimental study of the influence of parapets on the aerodynamic loads under cross wind on a two-dimensional model of train vehicle on a bridge, *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit*, 221, 487-494 (2007).

Barcala, M.A. & Meseguer, J. Visualization study of the influence of parapets on the flow around a train vehicle under cross wind, *Proceedings of Comprail 2008, Eleventh International Conference on Computer System Design and Operations in the Railway and Other Transit Systems*, WIT Press, Wessex (2008).

Baron, A., Mossi, M. & Sibilla, S., The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 89, 3657-401 (2001).

Bettle, J. Holloway, A.G.L. & Venart, J.E.S. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge on a cross-wind, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91, 573-592 (2003).

Chang-Hoon, S. & Warn-Gyu, P., Numerical study of flow characteristics of the high speed train entering into a tunnel, *Mech. Res. Communications*. 30, 287-296 (2003)

Da Riva, I., Manzano, D. R., Bernal, L. P., Magermans, M., Resco, G., Rodríguez Pérez, A., de la Rosa, B., Sánchez Súcar, A. & Viviente, A., Comportamiento aerodinámico de barreras cortavientos. Capítulo 1 y Capítulo 2, *Ing. Aeron. Astron.*, 116, 1-15 (1970).

Da Riva, I., Manzano, D. R., Bernal, L. P., Magermans, M., Resco, G., Rodríguez Pérez, A., de la Rosa, B., Sánchez Súcar, A. & Viviente, A., Comportamiento aerodinámico de barreras cortavientos. Capítulo 3 y Capítulo 4, *Ing. Aeron. Astron.*, 117, 17-53 (1971).

Diedrichs, B., Aerodynamic calculations of crosswind stability of a high-speed train using control volumes of arbitrary polyhedral shape. *Proceedings of BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*, Milano, Italy, July, 20-24 (2008).

Diedrichs, B., On computational fluid dynamics modelling crosswind effects for high-speed rolling stocks, *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit*, 217, 203-226 (2003).

Ding, Y., Sterling, M. & Baker, C.J., Unsteady crosswind forces on trains and corresponding aerodynamics parameters, *Proc. 4th European & African Conf. Wind Eng. (EACWE-4)*, 11-15 July, Prague (2005).

Franchini, S., Pindado, S., Meseguer, J. & Sanz-Andrés, A., A parametric, experimental analysis of conical vortices on curved roofs of low-rise buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 93, 639-650 (2005).

Gautier, P.E., Tielkes, T., Sourget, F., Allain, E., Grab, M. & Heine, C., Strong wind risks in railways : the DEUFRAKO crosswind program, *Proc. of WCRR 2003*, 463-475 (2003).

Gerhardt, H.J. & Krüger, O., Wind and train driven air movements in train stations, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 74-763, 589-5970 (1998).

Hyeok-Bin K., Young-Whe P., Dong-Ho L. & Moon-Sang K., Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 89, 1179-1195 (2001).

Imai, T., Fujii, T., Tanemoto, K., Shimamura, T., Maeda, T., Ishida, H. & Hibino, Y., New train regulation method based on wind direction and velocity of natural wind against strong winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90, 1601-1610 (2002).

Johnson, T. Strong wind effects on railway operations - 16th October 1987, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 60, 251-266 (1996)

Khier, W. Breuer, M. & Durst, F., Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study, *Comp. Fluids*, 29, 179-195 (2000).

Kwon, H., Park, Y., Lee, D. & Kim, M., Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 89, 1179-1195 (2001).

Mancini, G., Cross-wind aerodynamic forces on rail vehicles - Wind tunnel experimental tests and numerical dynamic analysis, *WCRR 2003*, 513-522. (2003).

Martínez, A., Vega, E., Gaité J. & Meseguer, J., Pressure measurements on real high-speed trains travelling through tunnels, *Proceedings of BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*, Milano, Italy, July, 20-24 (2008).

Matschke, G. & Heine, C. Full scale tests on side wind effects on trains. Evaluation of aerodynamic coefficients and efficiency of wind breaking devices, in *TRANSAERO. A European Initiative of Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation*, B. Schulte-Werning, R. Gregoire, A. Malfati and G. Matschke (eds.), Springer, Berlin 27-38 (2002).

Matschke, G. Schulte-Werning, B., Measures and strategies to minimise the effect of strong crosswinds on high-speed trains, *Proc. of WCRR 1997*, 569-575 (1997).

Matschke, G., Heine, C. & Schulte-Werning, B., Full scale tests on side wind effects on train. Evaluation of aerodynamic coefficients and efficiency of wind breaking device. *Notes Num. Fluid Mech. Multidisciplinary Design*, 79, 27-38 (2002).

Myung-Kwan S., Hyuk-Chun N. & Chang-Koon C., A new three-dimensional finite element analysis model of high-speed train-bridge interactions, *Eng. Struc.*, 25, 1611-1626 (2003).

Pindado, S. & Meseguer, J., Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91, 1133-1139 (2003).

Pindado, S., Meseguer, J., Martínez, A. & Franchini, S., Wind tunnel analysis on the influence of cantilever parapets on the wind loads of curved roofs, en "Advances in Fluid Mechanics V", V.A. Mendes, M. Rahman & C.A. Brebbia Eds., WIT Press, Wessex, 405-413 (2004).

Raghuathan, R.S., Kim, H.-D. & Setoguchi, T., Aerodynamics of high-speed railway trains, *Prog. Aerospace Sci.*, 38, 469-514 (2002).

Sanquer, S., Barré, C., Dufresne de Virel, M. & Cléon, L., Effect of cross winds on high-speed trains: development of a new experimental methodology, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 92, 535-545 (2004).

Santiago, J.L., Martín, F., Cuerva, A., Bezdenejnykh, N.A. & Sanz-Andrés, A., Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks, *Atmos. Environment*, 41, 6406-6420 (2007).

Sanz-Andrés, A. & Santiago-Prowald, J., Train-induced pressure on pedestrians, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90, 10075-1015 (2000).

Sanz-Andrés, A., Guerra Sierra, A., Bezdenejnykh, N.A. & Cuerva, A., Barreras cortavientos y otras medidas atenuadoras de las emisiones de polvo en los puertos, Organismo Público Puertos del Estado (Ed.), Madrid (2002).

Sanz-Andrés, A., Laverón, A., Baker, C.J. & Quinn, A., Vehicle induced loads on pedestrian barriers, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 92, 413-426 (2004).

Sanz-Andrés, A., Santiago-Prowald, J., Baker, C.J. & Quinn, A., Vehicle-induced loads on traffic sign panels, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91, 925-942 (2003).

Schetz, J., Aerodynamics of high-speed trains, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 33, 371-414 (2001).

Suzuki, M., Tanemoto, K. & Maeda, T., Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91, 209-218 (2003).

Takanobu, O. & Kozo, F., Numerical investigation of the three-dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel, *Comp. Fluids*, 26, 209-218 (1997).

Vardy, A.E. & Reinke, P., Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operation, *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit*, 213, 71-87 (1999).

Willemsen, E., High Reynolds number wind tunnel experiments on trains, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 69-71, 437-447 (1997).

William-Louis, M. & Tournier, C., A wave signature based method for the prediction of pressure transients in railway tunnels, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 93, 521-531 (2005).

## ESTUDIO MATEMÁTICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE LA RED ESPAÑOLA DE ANCHO IBÉRICO 1956-2006

### MATHEMATICAL STUDY OF THE EVOLUTION OF THE SPANISH BROAD GAUGE NETWORK 1956-2006

Eugenio Roanes Lozano (a), Luis M. Laita de la Rica (b), Eugenio Roanes Macías (c),  
Michael J. Wester (d), José Luis Ruiz Lozano (e), Carlos Roncero Clemente (f)

(a) Departamento de Álgebra, Universidad Complutense de Madrid  
eroanes@mat.ucm.es

(b) Departamento de Inteligencia Artificial, Universidad Politécnica  
de Madrid laita@fi.upm.es

(c) Departamento de Álgebra, Universidad Complutense de Madrid  
roanes@mat.ucm.es

(d) Department of Mathematics and Statistics, University of New Mexico  
wester@math.unm.edu

(e) jlrlmv@hotmail.com

(f) Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de Extremadura  
croncero@alumnos.unex.es

**Resumen:** Tras hacer una introducción histórica de la cuestión, los autores resumen aquí un estudio (hecho desde el punto de vista matemático), de la evolución de la topología de la red ferroviaria Española de ancho ibérico en el periodo 1956-2006, que ha sido recientemente publicado en la revista Mathematics and Computers in Simulation. Se muestra como la red ha perdido flexibilidad en este periodo.

**Palabras clave:** Análisis de Redes Ferroviarias, Teoría de Grafos, Sistemas de Cómputo Algebraico.

**Abstract:** After introducing the topic from an historical point of view, the authors summarize a mathematical study of the topological evolution of the Spanish gauge railway network in the 1956-2006 period that has recently been published in the journal Mathematics and Computers in Simulation. They show that the network has progressively lost flexibility over this time.

**Keywords:** Railway Network Analysis, Graph Theory, Computer Algebra Systems.

## 1. Perspectiva histórica

Es indudable que se está realizando una impresionante inversión en ferrocarriles en España en los últimos años, tanto en material móvil como en infraestructura (especialmente de ancho internacional para alta velocidad). Ello está repercutiendo claramente en la mejora de los tiempos de viaje y la calidad del servicio de pasajeros.

Sin embargo, la trama de la red española de ancho ibérico (la única por la que, por el momento, se realiza transporte de mercancías) se ha ido haciendo cada vez menos “densa” en el periodo estudiado (1956-2006). Ello es especialmente notorio si la comparamos con la que se hubiera podido contar si se hubieran concluido las líneas que estaban en construcción a finales de los años cincuenta del siglo XX (muchas de ellas iniciadas durante la dictadura del general Primo de Rivera, interrumpidas por la Guerra Civil y retomadas tras la contienda). Algo obvio es la desaparición de líneas de acceso a varias ciudades (por ejemplo, de Soria partían cuatro líneas, de las que queda una con servicio).

Esta evolución se puede apreciar con una simple inspección visual, por ejemplo, de la serie de mapas correspondientes a 1941, 1964, 1976 y 2006 que se incluyen a continuación (reproducidos por gentileza de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles).

En el primero de los mapas (1941) aparecen en verde intenso las líneas en construcción, de las que sólo se concluirían, esencialmente, el directo Madrid-Burgos y el acceso a Galicia por Zamora, abandonándose las obras de grandes líneas muy avanzadas como el Santander-Mediterráneo, la conexión directa de Andalucía Oriental con el Pirineo, o el tercer acceso a Extremadura (por Guadalupe). La situación se agravó considerablemente con los cierres de líneas deficitarias de 1985.

Ello ha provocado la aparición de grandes regiones sin servicio ferroviario, como el rectángulo Cáceres-Mérida-Ciudad Real, el triángulo Almería-Alcázar de San Juan-Murcia (que coinciden con zonas de baja densidad de población y que contienen zonas de alto valor ecológico).







También ha provocado la desaparición de líneas alternativas (muy útiles en caso de interrupción del servicio en una de ellas): acceso a Sevilla de MZA y acceso de Andaluces; Madrid-Medina del Campo por Avila y por Segovia; enlace central con Portugal por Fuentes de Oñoro y por La Fregeneda, etc.

Es curioso como el Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) redescubre, para algunas de las nuevas autovías planeadas, corredores que corresponden con más o menos exactitud a líneas ferroviarias en distintos grados de desuso: Vía de la Plata, Valladolid-Soria, Santander-Mediterráneo, Úbeda-Albacete, Huelva-Ayamonte, Córdoba-Zafra, conexión transpirenaica central, Almería-Cartagena.

## 2. Resultados obtenidos

Los autores del presente resumen han publicado recientemente en la revista *Mathematics and Computers in Simulation* (núm. 79, 2009, pp. 2317–2332) un detallado artículo titulado *Evolution of railway network flexibility: The Spanish broad gauge case*, sobre la evaluación objetiva, esto es, desde el punto de vista matemático, de la evolución de la topología de la red de ancho ibérico en España entre 1956 y 2006.

Para ello se recurrió al estudio de la red como un grafo (esto es, abstrayéndola como un conjunto de nodos o vértices –las estaciones, apeaderos, cargaderos, etc.– y de aristas o arcos –que unen dos vértices cuando éstos son adyacentes en la red ferroviaria–).

No se consideraron las duplicaciones, renovaciones, mejoras del trazado o electrificaciones de vías. La evolución, al excluir las aperturas de las líneas de alta velocidad, por ser éstas de ancho internacional, consiste, fundamentalmente, en la desaparición de ramales y la supresión de itinerarios

alternativos, con la consecuente eliminación de ciclos (un ciclo es un camino que parte de una estación por una línea y vuelve a la misma por otra línea).

Se ha utilizado una ampliación desarrollada por los autores del paquete especializado en teoría de grafos Networks del lenguaje de cálculo simbólico Maple. Una vez se le han proporcionado los arcos del grafo, este paquete puede calcular, por ejemplo: el número de líneas que parten de una estación; el camino mínimo entre dos estaciones; dada una lista de arcos, el camino mínimo entre dos estaciones que verifique que no incluya ningún arco de la lista dada; dada una estación, un ciclo que pase por cada vértice vecino, para todos aquellos vértices vecinos para los que sea posible; etc.

Como fuentes documentales se utilizaron, esencialmente, mapas y atlas publicados por RENFE y varias editoriales. Así, se han introducido manualmente todos los nodos y las aristas de la red en 1956, 1974, 1989 y 2006, además de los correspondientes a las obras inconclusas.

Como indicadores de la flexibilidad de la red se consideraron el número de ciclos y el número de nodos de orden intermedio (3,4,5), pues un nodo de orden 1 representa una ciudad que es término de una línea, de orden 2 una estación de paso, de orden 3 un empalme, de orden 4 un cruce de dos líneas, etc.

Distinguimos los que denominamos “ciclos independientes” (los considerados habitualmente en teoría de grafos) de los que denominamos “ciclos ferroviarios” (que permiten llegar a una estación por un camino alternativo).

Como resumen de los resultados, hay un estancamiento de la flexibilidad de la red (número de ciclos de ambos tipos) de 1956 a 1974 (la conclusión de las líneas Madrid-Burgos y Zamora-Santiago casi compensa el cierre de otras líneas como La Puebla de Híjar-Tortosa, Valchillón-Marchena, etc.). De 1974 a 1989 disminuye de una manera importante el número de ciclos de ambos tipos. Los resultados son mucho peores si se compara, con la red que se habría obtenido si se hubieran concluido las líneas en obras en 1956 e inacabadas (de 1989 en adelante ha habido sólo pequeños cambios como el corte de la línea Almorchón-Córdoba cerca de esta última ciudad). Ello se resume en la siguiente tabla.

| <b>Año/Datos</b>      | <b>Nodos</b> | <b>Aristas</b> | <b>Ciclos independientes</b> | <b>Ciclos "ferroviarios"</b> |
|-----------------------|--------------|----------------|------------------------------|------------------------------|
| 1956 y no inauguradas | 213          | 267            | 55                           | 58                           |
| 1956                  | 200          | 239            | 40                           | 43                           |
| 1974                  | 173          | 210            | 38                           | 43                           |
| 1989                  | 173          | 204            | 32                           | 34                           |
| 2006                  | 169          | 190            | 22                           | 23                           |

De modo similar, los números de vértices (estaciones) de órdenes 3,4 y 5, sufren un descenso acusado y progresivo de 1956 a 1989, que se hace aún más significativo si se compara con la red que se habría obtenido si se hubieran concluido las líneas en obras en 1956 e inacabadas. Aumenta el número de vértices de orden 8 de 0 a 1 por la construcción de nuevas líneas de cercanías en Madrid (Universidad Autónoma, Villaviciosa de Odón). Un resumen se puede encontrar en la tabla siguiente.

| <b>Año</b>         | <b>Orden 1</b> | <b>Orden 2</b> | <b>Orden 3</b> | <b>Orden 4</b> | <b>Orden 5</b> | <b>Orden 6</b> | <b>Orden 7</b> | <b>Orden 8</b> |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1956 y no inaugur. | 57             | 31             | 93             | 25             | 6              | 1              | 0              | 0              |
| 1956               | 60             | 32             | 82             | 22             | 4              | 0              | 0              | 0              |
| 1974               | 49             | 29             | 73             | 17             | 4              | 1              | 0              | 0              |
| 1989               | 52             | 34             | 68             | 15             | 2              | 1              | 0              | 1              |
| 2006               | 51             | 45             | 60             | 10             | 1              | 1              | 0              | 1              |

### **Nota y agradecimientos**

Queremos subrayar que la obtención de los grafos correspondientes a la red en los distintos años elegidos se ha hecho con la mejor voluntad y a partir de la bibliografía y los conocimientos de los autores. No obstante, no podemos asegurar la inexistencia de errores involuntarios.

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a Juan Manuel Jiménez Aguilar, Alberto García Álvarez y Miguel Jiménez Vega, de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, por la información proporcionada y el permiso para reproducir los mapas aquí incluidos.

Este trabajo fue parcialmente subvencionado por los proyectos MTM2004-03175 (Ministerio de Educación y Ciencia, España) y UCM2006-910563 (Comunidad de Madrid - Universidad Complutense de Madrid, Grupo de Investigación ACEIA).

# CÁLCULO DE LA RIGIDEZ VERTICAL DE LA VÍA EN FUNCIÓN DE LAS RIGIDECES VERTICALES DE LA PLACA DE ASIENTO Y DEL SISTEMA BALASTO-PLATAFORMA EN VÍAS DE ALTA VELOCIDAD.

Ramón Miralvés Buil. Investigador Ing. Industrial  
(miralbes@unizar.es)

Luis Castejón Herrero. Profesor Titular Universidad. Dr. Ingeniero Industrial  
(luiscast@unizar.es)

Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes.  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
C.P.S. - Universidad de Zaragoza, 50018, Zaragoza (España)

**Resumen:** El objeto de este estudio es la determinación de una fórmula matemática que correlacione las rigideces verticales de los principales elementos que forman la vía de alta velocidad en los casos en los que se empleen los elementos constructivos habituales. Para ello, partiendo de las formulaciones tradicionales se ha propuesto un modelo matemático, el cual se ha verificado y contrastado con los datos reales de líneas de alta velocidad.

Con ello se ha obtenido una expresión sencilla que correlaciona de forma bastante fiable la rigidez vertical de la vía con las rigideces verticales de los conjuntos que la forman, esencialmente con la placa de asiento y el conjunto balasto-plataforma. Por otro lado, también se ha comprobado la validez del modelo para seleccionar las rigideces de la placa de asiento y el conjunto balasto-plataforma en función de una de estas rigideces y de la rigidez vertical que se quiere obtener.

**Palabras clave:** ferrocarril, vía, rigidez vertical, balasto, plataforma, placa de asiento.

**Abstract:** The object of this study is the determination of a mathematical formula that correlates the vertical inflexibilities of the principal elements that form the high speed track in the cases in which there are used the constructive habitual elements. For it, departing from the traditional formulations a new mathematical model has been proposed, which has been checked and contrasted with the real information of high speed. lines

With it a simple expression has been obtained that correlates in quite a reliable way the vertical inflexibilities of the sets that form it, essentially with the ribbed sole-plate and the set ballast platform. On the other hand, the validity of the model has also been verified to select the inflexibilities of the ribbed sole-plate and the set ballast-platform depending on one of these inflexibilities and of the vertical inflexibility that wants to be obtained.

**Keywords:** railroad, route, vertical inflexibility, balasto, platform, ribbed sole-plate.

## 1. Introducción

El desarrollo de las líneas de ferrocarril, en especial las de alta velocidad, pone de manifiesto necesidad de establecer una rigidez vertical óptima en el trazado, para conseguir unas instalaciones que, a lo largo de su vida útil, presenten unos costes globales menores. Estos costes son los debidos tanto al mantenimiento de la vía, la construcción de la vía y el coste de la energía disipada por el rozamiento, los cuales están altamente relacionada con la rigidez vertical de la vía.

Es por ello que diversos autores han intentado solventar dicho problema con la introducción de diversas teorías y formulaciones, de las cuales, la actualmente mas desarrollada es la de *Teixeira*.

En dichas teorías se pretende obtener una rigidez vertical óptima de la vía que minimice los costes globales de la vía; sin embargo, no presentan la forma de obtener la rigidez vertical de la vía en función del los elementos que la componen, salvo mediante determinación experimental y bases de datos. Es por ello que, a lo largo de este trabajo, se pretende obtener una correlación matemática directa que relacione la rigidez vertical de la vía, la rigidez de la placa de asiento y la rigidez del resto de los elementos, con el fin de poder seleccionar rápidamente a partir de las formulaciones anteriormente mencionadas una placa de asiento que proporcione la rigidez vertical óptima a la vía y con ello obtener una rigidez óptima de la vía en función de las teorías establecidas por otros autores, y en especial en el caso de la alta velocidad, sector actualmente en amplio desarrollo.

## 2. Descripción de la geometría de líneas de alta velocidad

Como paso previo a la formulación de nuestro método, es necesario observar los elementos que componen.

Al analizar la infraestructura de cualquier línea de alta velocidad, podemos constatar que estructuralmente, está constituida por los siguientes conjuntos:

- Plataforma
- Sub-balasto
- Balasto
- Placa de asiento
- Traviesas
- Vía o riel

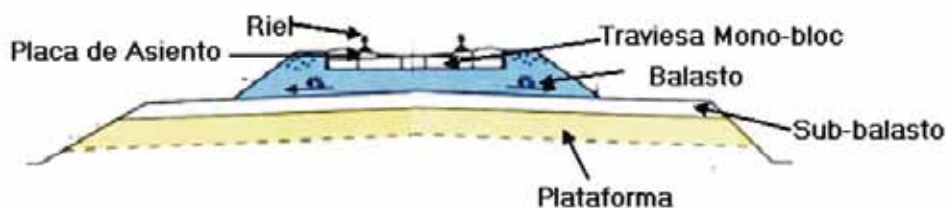


Fig. 1: Sección Transversal de una línea de Alta Velocidad

Dentro de estos elementos, la rigidez vertical tanto de la plataforma, el sub-balasto y el balasto depende de las propiedades de los elementos introducidos en estos conjuntos, las propiedades de las capas y el espesor de estas, factores condicionados frecuentemente por el terreno y la normativa aplicable. Además de ello la relación de las rigideces de estos elementos son difíciles de constatar y difíciles de variar de forma sencilla al haber una gran relación entre ellos.

En relación a las traviesas en alta velocidad, se ha optado por lo general por traviesas de hormigón mono-bloc, pre o post-tensadas de 2,6 a 2,8 m de longitud y de 300 a 400 Kg. de peso por unidad, las cuales suelen tener una rigidez bastante mas elevada que el resto de los elementos.

Con respecto las vías hay que destacar que se ha generalizado el empleo del carril UIC60 en alta velocidad, hecho por el cual la rigidez de este elemento siempre es la misma en estos carriles salvo que se emplee un material diferente al habitual, con lo cual variaría su módulo elástico. Cabe destacar de nuevo que la rigidez de este elemento en relación al resto es elevada.

En relación a la placa de asiento, cabe destacar que existe gran variedad de soluciones constructivas para este elemento, del cual se sabe perfectamente su rigidez vertical en función de la solución adoptada.

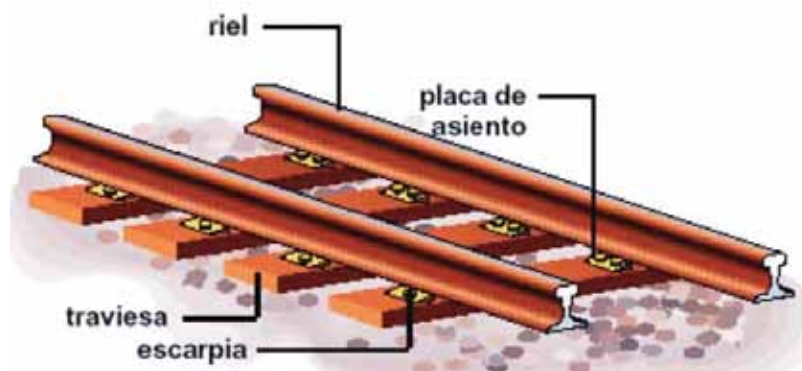


Fig. 2: Traviesa, riel y Placa de Asiento

Con todo ello se observa que, para modificar la rigidez vertical de la vía y adaptarnos a la rigidez vertical optima, el único elemento que se puede modificar de una forma relativamente sencilla es la placa de asiento.

### 3. Teoría del coeficiente de rigidez del apoyo

A lo largo de la historia han aparecido diversas formulaciones y teorías, cuya finalidad era la evaluación de la rigidez vertical de una vía ferroviaria. De esta forma han aparecido teorías como la del Coeficiente de Balasto, la de Timoschanko-Saller-Henkel, la del Modulo de vía y la de Coeficiente de Rigidez de Apoyo.

De estas teorías cabe destacar la “Teoría del Coeficiente de Rigidez del Apoyo” que establece un modelo en el cual la rigidez global está relacionada con las rigideces parciales de cada uno de los elementos que lo forman, suponiéndolos como elementos elásticos, los cuales se asemejan a un conjunto de cuatro muelles dispuestos en paralelos. Es por ello que establece que:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_p} + \frac{1}{K_{pa}} + \frac{1}{K_{nav}}$$

Ecuación 3.1

$K_{eq}$ : Rigidez Vertical de la vía  
 $K_b$ : Rigidez vertical del Balasto  
 $K_p$ : Rigidez Vertical de la Plataforma  
 $K_{pa}$ : Rigidez Vertical de la Placa de Asiento  
 $K_{trav}$ : Rigidez Vertical de la Travesía

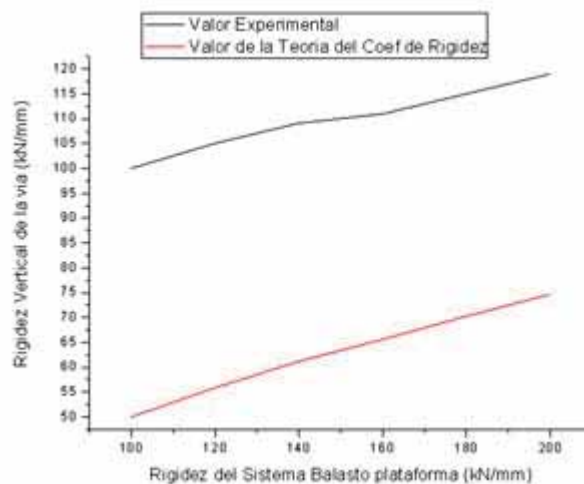
Por otro, se observa que la rigidez de la vía y la plataforma es muy superior a la del resto de elementos, hecho por el cual, su contribución a la rigidez global es despreciable. Por otro lado, existe el problema de hallar por separado las rigideces del balasto y de la plataforma. Es por ello que la fórmula anterior se modifica y se simplifica como:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{bp}} + \frac{1}{K_{pa}}$$

**Ecuación 3.2**

$K_{bp}$ : Rigidez vertical del Conjunto balasto-plataforma.

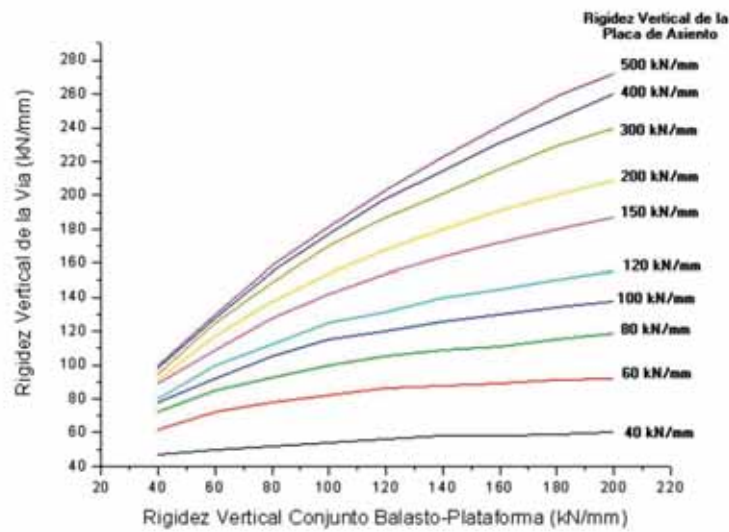
Sin embargo, los resultados obtenidos experimentalmente relacionados con las rigideces presentan valores muy diferentes, como se puede observar en la grafica 1.



**Gráfica 1: Rigidez Vertical de línea de alta Velocidad en función de la rigidez del Sistema balasto-Plataforma con una placa de asiento de 60 kN/mm**

#### 4. Datos experimentales

Para la elaboración del estudio se han partido de los datos experimentales de líneas de alta velocidad con vías UIC60 y traviesas como las anteriormente establecidas. En los datos lo que se ha hecho es obtener la rigidez vertical experimentalmente, variando tanto la rigidez vertical del sistema balasto-plataforma como la rigidez vertical de la placa de asiento.



**Gráfica 2: Rigidez Vertical experimental de la vía en función de las rigideces verticales del Conjunto Balasto-Plataforma y de las rigideces verticales de la Placa de Asiento**

## 5. Aproximación matemática de la rigidez vertical de la vía

Para obtener la fórmula que relación la rigidez vertical de la vía en función de las rigideces verticales del resto de los elementos, se ha partido de la teoría del coeficiente de balasto, pero en esta ocasión se ha supuesto una fórmula del tipo:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{A}{K_{bp}} + \frac{B}{K_{pa}} + C$$

**Ecuación 5.1**

Con ello se pretende, partiendo de la anterior teoría y suponiendo este tipo de relación, por un lado, añadir una serie de pesos (A y B) a cada una de las rigideces parciales y por otro lado, magnificar con la constante “C” la rigidez del resto de elementos que pueden contribuir.

Tras ello, se despejó  $K_{eq}$  con el objeto de obtener mediante un proceso iterativo una expresión que se aproximara lo máximo posible. Así pues se aproximaron los datos experimentales a la siguiente expresión:

$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{A}{K_{bp}} + \frac{B}{K_{pa}} + C}$$

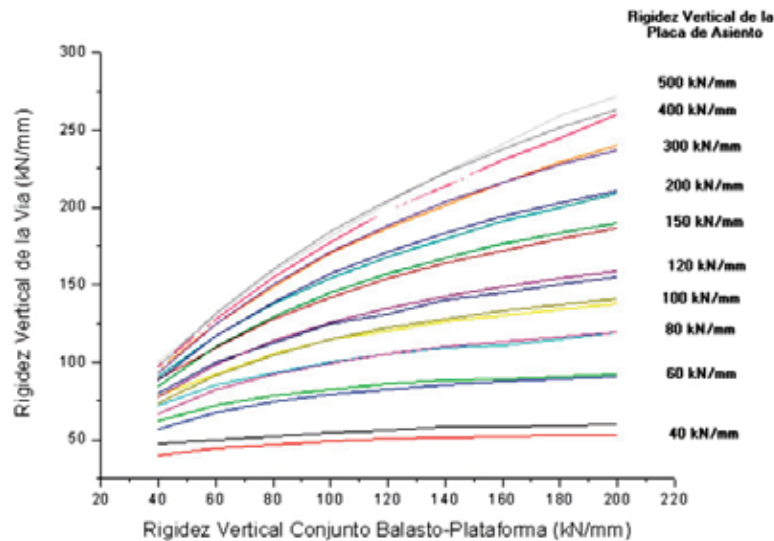
**Ecuación 5.2**

Con ello, aplicando métodos de aproximación iterativos se obtuvo que:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{0.32732}{K_{bp}} + \frac{0.31472}{K_{pa}} + 0.00153$$

Ecuación. 5.3

Con ello, aproximando los valores experimentales:



Gráfica 3: Aproximación de Rigidez vía Comparado con Datos Reales

Al analizar los datos obtenidos con la fórmula anterior, observamos que la aproximación presenta un  $R^2$  de 0.99 el cual es un valor aceptable para dicha fórmula y, al analizar los valores obtenidos y compararlos con los reales obtenemos un error máximo al realizar la aproximación del 16%, siendo el error medio del 2.8% de los valores reales frente a la aproximación, por lo cual la fórmula anterior puede ser una aproximación muy fiable para obtener la rigidez vertical de la vía en función de la del resto de los elementos.

## 6. Inconvenientes del modelo propuesto

El principal problema que presenta el anterior modelo es que, al despejar las rigideces del balasto-plataforma o de la placa de asiento en función de la rigidez del otro elemento. Es decir:

$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{A}{K_{bp}} + \frac{B}{K_{pa}} + C} \Rightarrow K_{bp} = \frac{0.31472}{\frac{1}{K_{eq}} - \frac{0.32732}{K_{pa}} - 0.00153}$$

Ecuación. 6.1

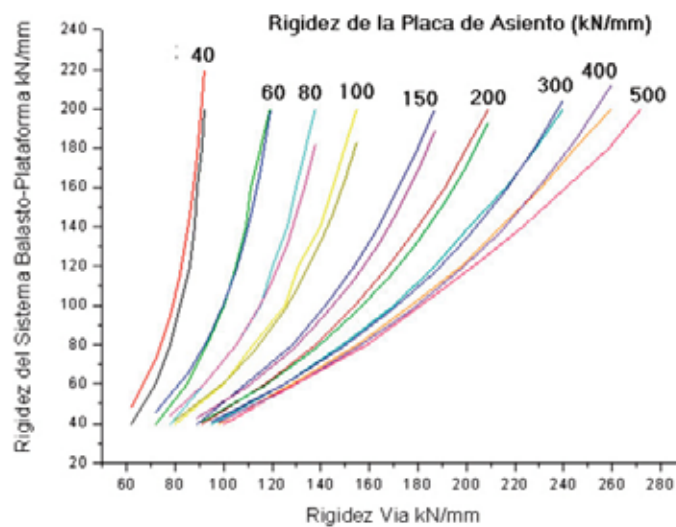
$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{A}{K_{bp}} + \frac{B}{K_{pa}} + C} \Rightarrow K_{pa} = \frac{0.32732}{\frac{1}{K_{eq}} - \frac{0.31472}{K_{bp}} - 0.0015}$$

Ecuación 6.2

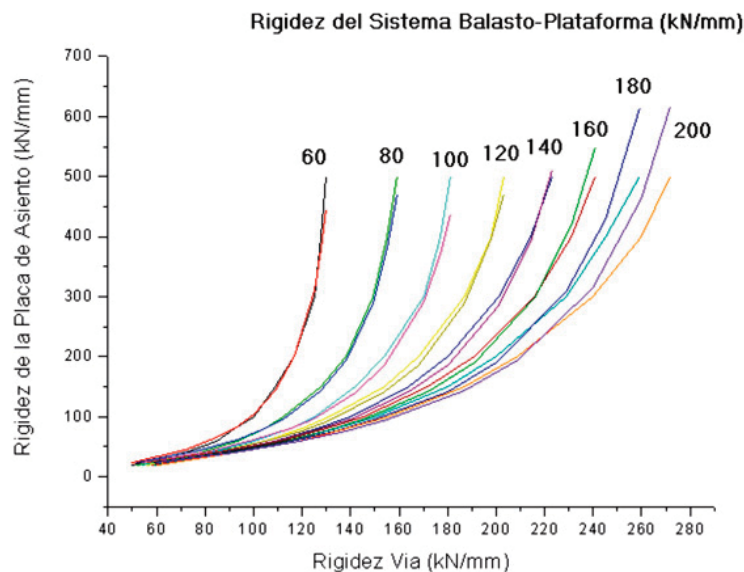
El error que se produce es muy elevado para los casos en los cuales la variable analizada es muy pequeña. Es decir: en el caso de que se quiera obtener  $K_{bp}$  en función de la rigidez óptima y de  $K_{pa}$ , los valores obtenidos presentan un error elevado para las  $K_{bp}$  bajas y lo mismo ocurre para las  $K_{pa}$ , imposible de subsanar por las características de la ecuación.

Es por ello que las ecuaciones anteriormente expuestas, en el caso de la ecuación 6.1, para  $K_{bp}$  igual o superior a 40 kN/mm, presentan un error inferior al 5.3 % para cualquier valor del resto de parámetros, y en el caso de la ecuación 6.2 el error es también inferior al 5.3 % para un rango de valores de  $K_{pa}$  igual o superior a 60 kN/mm.

Con todo ello se resuelve que, las ecuaciones anteriormente expuestas son totalmente válidas para un rango de  $K_{bp}$  igual o superior a 40 kN/mm y  $K_{pa}$  igual o superior a 60 kN/mm.



**Gráfica 4: Aproximación de la Rigidez del Sistema Balasto-Plataforma Aproximada Comparada con Datos Reales**



**Gráfica 5: Aproximación de la Rigidez de la Placa de Asiento Aproximada Comparada con Datos Reales**

## 7. Conclusiones

Las principales conclusiones que se derivan tras analizar la ecuación impuesta, es que ésta, presenta unos valores de error aceptables y una correlación entre valores bastante buena, para un rango de  $K_{bp}$  igual o superior a 40 kN/mm y  $K_{pa}$  igual o superior a 60 kN/mm.

Por otro lado, la ecuación 5.3 es una correlación muy buena para cualquier rango de valores del resto de parámetros.

Con todo ello, se obtiene que se presenta un modelo matemático bastante bueno para la estimación de la rigidez vertical de una vía en función de las rigideces parciales del conjunto balasto-plataforma y de la placa de asiento, con lo cual puede ser empleada para futuras implementaciones en las que sea necesario obtener la rigidez vertical de la vía en función de las de sus componentes, presentando unos valores muy próximos a la realidad.

## Bibliografía

CAI, Z., RAYMOND, G.P., BATHURST, R.J. , (1994), “Estimate of Estatic Track Modulus Using Elastic Formulation Models”. Transportation Research Record 1470. pp. 65-72

PUEBLA, J., GILBERTE, M., (1999). “La Vía sobre Balasto y su Comportamiento Elástico” III Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Barcelona.

SELIG, y D. LI (1994). “Track Modulus: its meaning and factors influencing it”. Transportation Research Recorder 1470. pp 47-54.

TEXEIRA, P.F. y LOPEZ-PITA, A.(2002) “Nuevos Criterios para Reducir los Costes de Mantenimiento de Líneas de Alta Velocidad”. V Congreso de Ingeniería del Transporte”, Santander, Junio.

Narayanan, R.M., Jakub, J.W., Li, D.Q. ”Railroad Track Modulus Estimation Using ground Penetrating Radar Measurements”. NDT&E INT 37 (2): 141-151 MAR 2004

UZARSKI, D. “Technologies for Planning Railroad Track Maintenance and Renewal” Journal Of Transportation Engineering- Asce 120 : 807 1994



Parte II  
**Explotación**



# EL HORARIO CADENCIADO INTEGRADO. TEORÍA, CASOS DE APLICACIÓN, VENTAJAS, INCONVENIENTES, Y REFLEXIONES SOBRE SU POSIBLE APLICACIÓN EN ESPAÑA

**Riccardo Lombardi**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
INECO-TIFSA. Dirección de Proyectos Ferroviarios.  
e-mail: [ric.lombardi@gmail.com](mailto:ric.lombardi@gmail.com) - [riccardo.lombardi@ineco.es](mailto:riccardo.lombardi@ineco.es)

**Resumen:** El Horario Cadenciado Integrado (HCI) es una forma de planificar los horarios ferroviarios de servicios de viajeros que se ha consolidado en países como Holanda, Alemania y Suiza. Es cadenciado porque los servicios se repiten con cadencia (semihoraria, horaria, bihoraria), e integrado porque los horarios son estructurados de manera que se agilicen enlaces entre distintos servicios, minimizando el tiempo de espera para el usuario. Este artículo pretende cubrir una laguna en la bibliografía técnica nacional, donde hasta ahora las referencias son muy escasas, desarrollando distintas temáticas: los fundamentos teóricos del proceso de diseño del HCI, dos casos reales de aplicación en Europa, un resumen de ventajas e inconvenientes de su adopción, y un análisis de varios aspectos del sistema ferroviario español en relación a una posible introducción del HCI en nuestro país.

**Palabras clave:** HCI, horario cadenciado, horario cadenciado integrado, horario simétrico, planificación de horarios, transporte público, Suiza, ferrocarriles, enlaces, nodos.

**Abstract:** The integrated periodic timetable (IPT) is a specific type of railway timetable for passenger services that has been progressively implemented in the last few decades in countries such as Holland, Germany, and Switzerland. It is *periodic* because services are guaranteed at constant intervals (every half hour, hour, two hours, etc.), and *integrated* because the timetables are structured as to efficiently utilize connections between services and minimize passenger waiting time. The article's purpose is to fill the gap in Spanish technical literature, which provides very few references on this subject, through the analysis of different themes: the theoretical basics of the design of the integrated periodic timetable, a summary of its advantages and disadvantages, two cases of application in Europe, and the analysis of various aspects of the Spanish rail system with a view to possibly introducing the IPT in our country.

**Keywords:** IPT, periodic timetable, integrated periodic timetable, symmetric timetable, timetable scheduling, public transport, Switzerland, railways, junctions, nodes.

## 1. Introducción y objeto

Por razones obvias los horarios cubren un papel fundamental en la definición de un servicio de transporte ferroviario, y tienen una influencia directa sobre su potencial de captación de viajeros.

Siguiendo un planteamiento simplista, el horario de un servicio dado puede estudiarse con el único objetivo de cubrir la mayor cantidad posible de demanda, sin ninguna relación entre el horario de un tren y el siguiente. Sin embargo, la tendencia en las últimas 3-4 décadas en Europa es adoptar horarios de tipo *cadenciado*. Un servicio ferroviario se ofrece con un horario cadenciado, cuando los horarios de paso de los trenes se repiten con cierta *cadencia*, que puede ser habitualmente de una o más horas, o bien de un cociente de divisor entero de una hora (es decir, 10, 12, 15, 20, 30 minutos). Esto conlleva que los horarios sean característicos y de fácil memorización para el usuario, ya que los minutos de salida se repiten a lo largo del día. Por ejemplo, un horario de la forma 7:17, 8:17, 9:17, etc. es cadenciado a los 60 minutos, y un horario como 8:20, 8:50, 9:20, 9:50 es un horario cadenciado a los 30 minutos. Obviamente pueden alternarse distintas frecuencias a lo largo del día, para adaptarse a las franjas horarias de mayor y menor demanda.

El éxito de la utilización de horarios cadenciados es un hecho comprobado en Europa, principalmente por dos factores:

- La facilidad de memorización del horario, que en muchos casos hace innecesaria la consulta del mismo en el momento que se decida emprender un viaje.
- La seguridad de disponer de una malla mínima de servicios también en horas valle, que contribuye a que la opción de utilizar el tren se convierta en algo habitual.

Sin embargo los argumentos mencionados hasta ahora se limitan a un ámbito casi psicológico y por sí solos conllevan una mejora limitada en el nivel de servicio percibido por el viajero.

El objeto del presente documento es analizar el siguiente paso de optimización de un servicio ferroviario, que consiste en integrar los horarios cadenciados a otro punto fuerte del ferrocarril, es decir, la *facilidad de realizar transbordos* respecto a otros medios de transporte (el avión por la inviabilidad de efectuar paradas intermedias y el transporte por carretera por su peor puntualidad).

Los beneficios de combinar servicios cadenciados y conexiones con transbordos se pueden deducir de un ejemplo sencillo: si en una estación dada entre la llegada de un tren y la salida de otro existe un intervalo de tiempo mínimo y a la vez suficiente para realizar una conexión con transbordo (por ejemplo del orden de 5-10'), y si ambos servicios son cadenciados, esta misma posibilidad de conexión se repite igualmente a lo largo del día.

*Así, nos referimos a un **horario cadenciado integrado** (de ahora en adelante, HCI) como a un conjunto de horarios de distintos servicios ferroviarios, concebidos para favorecer enlaces con transbordo entre distintos trenes en varias estaciones.*

En el presente documento, además de facilitar referencias históricas, se tratarán los fundamentos teóricos del HCI, citando unos casos prácticos, se hará un resumen de sus ventajas e inconvenientes, y finalmente se expondrán consideraciones varias sobre su aplicabilidad a la red ferroviaria española.

## 2. Historia

Las primeras aplicaciones del HCI se realizaron en Holanda, Suiza y Alemania. Hasta entonces existían diversas relaciones comerciales explotadas con horarios cadenciados, sin embargo en ningún caso se llegaba a un horario integrado, es decir, los distintos servicios no eran concebidos para favorecer las conexiones entre ellos.

- 1908: Primer horario cadenciado en la línea Rotterdam - Scheveningen.
- 1921: Introducción del horario cadenciado en la *London & South Railway*.
- 1938: Extensión del horario cadenciado a toda la red holandesa.
- 1968: Primer horario cadenciado en dos líneas en Suiza.
- 1970: **Primer sistema de HCI en Holanda**, *Spoorslag '70*. Su eficacia fue tan elevada que la estructura del horario en los ferrocarriles holandeses no volvió a modificarse de forma sustancial hasta el cambio de horario del 10 de Diciembre de 2006.
- 1977: Introducción de un horario cadenciado en el Reino Unido, *Full Inter-City 125 services*.
- 1979: Los ferrocarriles alemanes introducen **el primer HCI** en su red de Intercity (largo recorrido), con el eslogan "*Jede Stunde, Jede Klasse*" (*todas las horas, todas las clases*, ya que anteriormente los Intercity se explotaban como trenes solo de primera clase)
- 1982: Introducción del **HCI en toda la red suiza**.
- 1993: Introducción progresiva del HCI a nivel regional en Alemania.
- 2004: Primera etapa del proyecto *Bahn 2000* en Suiza, con entrada en vigor de un nuevo HCI.

## 3. Los requisitos: cadenciamiento, ejes de simetría y nodos

Analizando una malla homogénea y cadenciada de una única tipología de servicio, ésta goza de una interesante propiedad de simetría: siendo  $t$  el intervalo entre trenes cadenciados, se pueden identificar en cada intervalo dos ejes de simetría entre los surcos de trenes en dirección opuesta. La distancia entre los ejes de simetría será igual a  $t/2$ . Este principio es válido para cualquier malla de servicios cadenciados y homogéneos (mismas paradas y tiempos de recorrido), es decir, sin analizar el mallado completo de una línea, sino considerando un tipo de servicio concreto. Se puede comprender mejor la existencia de dos ejes de simetría dentro de un mismo cadenciamiento con los ejemplos siguientes.

**Ejemplo 1:** *Imagínese que en una línea de doble vía, está saliendo en una determinada dirección un tren cada hora. Estos trenes tienen idénticas paradas, velocidades, etc. En sentido opuesto también viajan los mismos trenes, con mismas paradas, velocidades y con la misma frecuencia de un tren cada hora. Si un observador se sube en la cabina de un tren, asistirá a un cruce cada media hora. Estos puntos de cruce identifican los ejes de simetría en el mallado.*

**Ejemplo 2:** *En la línea Madrid – Sevilla (horario 2010), los servicios AVE con parada únicamente en Córdoba, tienen salida de Madrid en el minuto :00 y llegada a Sevilla en el minuto :30 (sin tener en cuenta*

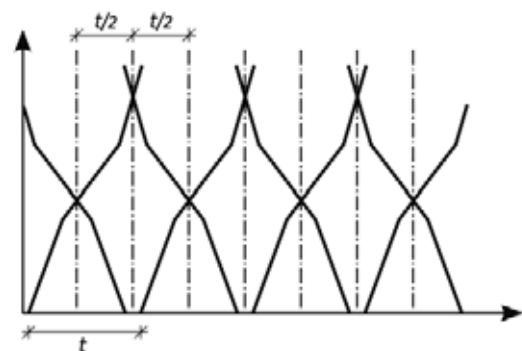
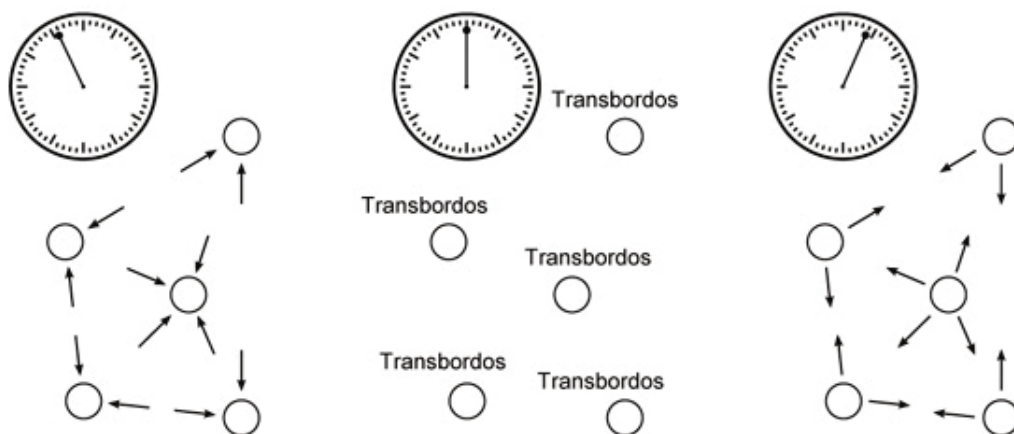


Figura 1: Ejes de simetría en un horario cadenciado



**Figura 2: Funcionamiento de una red con horario cadenciado integrado y nodos de conexión.**

*refuerzos en hora punta). En el trayecto inverso tienen salida de Córdoba en el minuto :45 y llegada a Madrid en el minuto :15. Los ejes de simetría se encuentran entonces en el minuto 7,5' y 37,5'. Por lo tanto, dos veces por hora, en los minutos 7,5 y 37,5, se producirán unos cruces en línea (salvo obviamente retrasos)*

Esta característica es una simple propiedad geométrica (como se muestra en la Figura 1) y de por sí no supone ninguna ventaja ni para el usuario ni para el planificador. Al contrario, para realizar un HCI, una condición prácticamente imprescindible en una red ferroviaria compleja es **la adopción del mismo eje de simetría para todos los servicios**.

Si todos los servicios comparten el mismo eje de simetría, **en estaciones elegidas oportunamente se puede estructurar el horario para que los horarios de llegada se concentren en pocos minutos antes del eje de simetría elegido. Por la propiedad de simetría, los horarios de salida se situarán poco después del eje de simetría. El resultado es que un viajero que llegue a esta estación, con pocos minutos de espera tendrá a su disposición una variedad de trenes con salidas a varios destinos**.

Por ejemplo, en el caso de referirse al eje de simetría en el minuto :00, en una estación X, si hay tres relaciones procedentes de A, B y C y con llegada en los minutos :52, :55 y :57, las salidas hacia los mismos destinos A, B y C deberán efectuarse, por la propiedad de simetría, en los minutos :08, :05 y :03. De esta forma, cualquier viajero procedente de A que quiera viajar a B o C puede llegar a su destino con un transbordo en X y con un tiempo de espera muy limitado. Esta misma consecuencia vale para cualquier otra combinación con origen / destino A, B o C.

Una estación con un horario configurado de tal manera, se convierte en un punto de intercambio, y en la teoría del HCI se define como **nodo**. Extendiendo este principio a otras estaciones se puede llegar a obtener una red compuesta por líneas y nodos, donde un usuario puede llegar a cualquier punto de la red directamente o a través de uno o más transbordos en los nodos.

### 3. Fundamentos teóricos

En los apartados siguientes se exponen los fundamentos teóricos y el proceso ideal de definición del esquema básico de una red cadenciada integrada, que consiste en la identificación de potenciales

nodos de conexión. En general el proceso se expone siempre refiriéndose al cadenciamiento habitual de 60 minutos, siendo éste conceptualmente idéntico para cualquier cadenciamiento. Para casos particulares se han añadido ejemplos con el fin de aclarar ciertos conceptos cuando éstos se traspasan a cadenciamientos diferentes.

#### 4.1. Definición de los nodos

##### 4.1.1. Tipos de nodo

Se ha comentado que por la propiedad de simetría, en el intervalo  $t$  de un cadenciamiento se encuentran dos ejes de simetría. En el cadenciamiento horario existirán por lo tanto dos ejes de simetría en el intervalo de una hora. Los ejes de simetría habitualmente elegidos se corresponden a los minutos :00 y :30. Refiriéndose a un cadenciamiento en general, se puede afirmar que siempre existen dos tipos de nodo en un cadenciamiento  $t$ : la “clasificación” del nodo depende únicamente de en torno a qué eje de simetría se están concentrando las llegadas y salidas. Existirán por lo tanto nodos  $t$  (:00 en el caso del cadenciamiento horario) y nodos  $t/2$  (:30 para el cadenciamiento horario).

Dado que en la realidad en una red compleja coexistirán servicios con intensidades de tráfico diferentes, también deberán coexistir cadenciamientos diferentes: para que entonces puedan existir también conexiones entre servicios horarios con bihorarios, o semihorarios con horarios, lo lógico será hacer que estos servicios compartan algunos ejes de simetría. Es decir, un eje de un cadenciamiento horario también debería ser uno de los ejes de simetría de un cadenciamiento semihorario.

Así, si los ejes del cadenciamiento horario son los minutos :00 (tipo  $t$ ) y :30 (tipo  $t/2$ ), para un cadenciamiento semihorario será oportuno utilizar los minutos :00/:30 (tipo  $t$ ) y los minutos :15/:45 (tipo  $t/2$ ). Para un cadenciamiento bihorario, existirán nodos :00 de horas pares (tipo  $t$ ) y nodos :00 de horas impares (tipo  $t/2$ ), o bien, para que se puedan distinguir de manera más inmediata, nodos :00 y nodos :60.

El hecho que un nodo sea de un tipo u otro tiene una importancia fundamental en la definición de la red, como se verá en el apartado siguiente.

| Cadenciamiento | Nodos del primer tipo ( $t$ ) | Nodos del segundo tipo ( $t/2$ ) |
|----------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 120 minutos    | :00                           | :00 o bien :60 *                 |
| 60 minutos     | :00                           | :30                              |
| 30 minutos     | :00/:30                       | :15/:45                          |

\* la denominación ":60" es ficticia y sirve únicamente para distinguir los dos tipos de nodos (" $t$ " y " $t/2$ "), que en ambos casos tendrán simetría alrededor del minuto :00

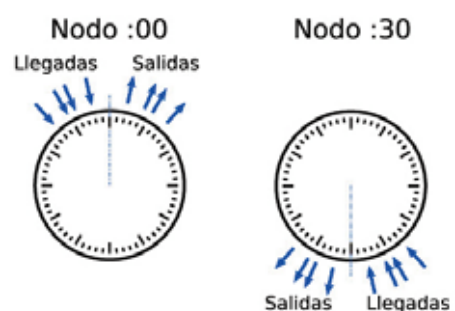


Figura 3: Resumen de tipos de nodo por tipo de cadenciamiento y ejemplos de nodos :00 y :30

#### 4.1.2. Proceso de definición de los nodos

Para simplificar imagínese que los tiempos de trasbordo en los nodos sean nulos y que todos los trenes puedan llegar y salir a la vez en los minutos :00 y :30 asegurándose todas las conexiones.

Un tren que salga de un nodo deberá llegar a otro nodo en un tiempo múltiplo de  $t/2$ , es decir en este caso de 30 minutos. Si la relación es entre dos nodos diferentes (:00 con :30) el tiempo deberá ser de 30, 90, 150 minutos, es decir igual a  $at+t/2$  siendo  $a$  cualquier número entero. Si la relación es entre dos nodos iguales (:00 con :00 o :30 con :30) el tiempo de viaje deberá ser de 60, 120, 180 minutos, es decir  $at$ . Como criterio general habrá que buscar entonces tramos con tiempo de viaje cercanos a múltiplos de  $t/2$ , y a partir de ellos se definirán los nodos y sus “categorías” (:00 o :30). En realidad hay que asegurar un mínimo colchón de tiempo en los nodos para los transbordos, por lo que los tiempos de recorrido reales deberán ser estrictamente inferiores a dicho múltiplo.

*Ejemplo: un tramo con un tiempo de recorrido de 35 minutos es conveniente contemplarlo como un tramo de 60 minutos entre dos nodos :00 (o entre dos nodos :30). El tren podría por ejemplo salir de un nodo en el minuto :12 y llegar al otro en el minuto :47, en ambos casos conexiones con tiempos de espera más que aceptables.*

El proceso de búsqueda y definición de estaciones como nodos es iterativo y no existe una metodología exacta para ello. Además, en la gran mayoría de los casos la elección de ciertas estaciones como nodos depende de factores que trascienden el ámbito matemático (entre otros, factores ambientales, económicos, de capacidad de la infraestructura, de importancia de ciertas relaciones frente a otras, y de planificación a largo plazo). En efecto, este proceso culmina con toda probabilidad con la definición de una red “óptima“ entre varias alternativas imperfectas, privilegiando ciertos nodos/estaciones sobre otros. El ejemplo siguiente aclara como se puede llegar a situaciones absurdas en el proceso de definición de nodos.

**Ejemplo:** En este caso se han definido dos nodos *A* y *B*, siendo el tiempo de recorrido entre estos inferior a 30 minutos, y por tanto uno de los dos debe ser necesariamente un nodo :00 y el otro :30. La estación *C*, que se pretende definir también como nodo, se caracteriza por un tiempo de recorrido inferior a 30 minutos entre *B* y *C* y también entre *C* y *A*. Refiriéndose a *B*, la estación *C* debería entonces definirse como nodo :30, y respecto a *A* debería definirse como nodo :00. Se ha llegado a un absurdo y su consecuencia es la imposibilidad de asegurar un enlace adecuado con ambos nodos *A* y *B*, o mejor dicho, una de las dos conexiones sería más desfavorable con tiempos de espera mayores (superiores a media hora). Las soluciones posibles son renunciar a definir *C* como nodo, o bien privilegiar la conexión que se valora como más prioritaria. En este caso, si se quiere privilegiar la conexión *B-A-C* en *A*, se definirá *C* como nodo :00; si se prefiere privilegiar en *B* la conexión *A-B-C* se definirá *C* como nodo :30.

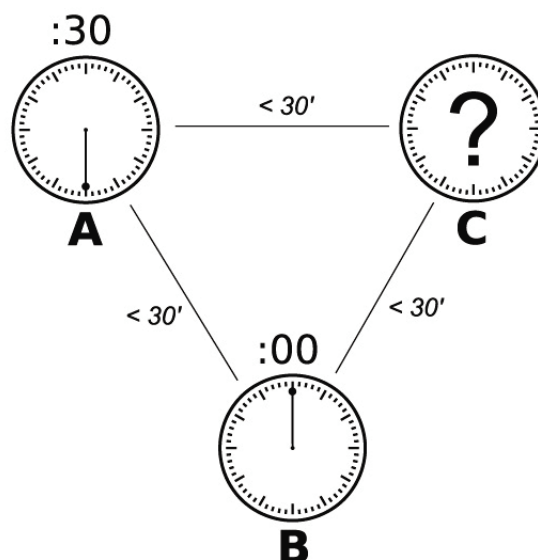
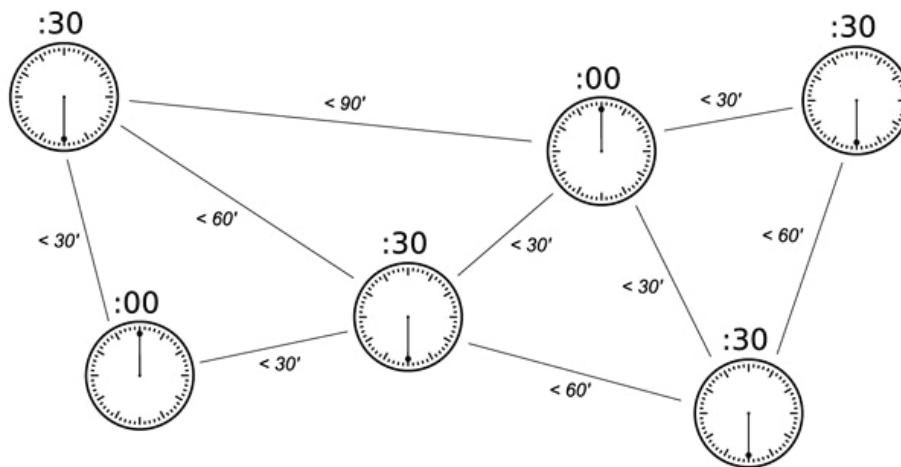


Figura 4: Ejemplo de situación absurda en la búsqueda y definición de nodos de conexión.

El resultado final del proceso de definición de la red y de los nodos es un esquema parecido al de la figura siguiente.



**Figura 5: Resultado del proceso de definición de red y nodos de conexión**

#### 4.1.3. Funcionamiento: nodos totales y parciales

No siempre resulta posible poder asegurar todas las conexiones en una estación que se pretende definir como nodo, por diferentes razones: la más obvia e importante de ellas es que en muy pocos casos los tiempos de recorrido entre un nodo y otro se acercan a los valores característicos de 30', 60', 90', etc. Se define **nodo total** un nodo donde todas las conexiones (o razonablemente casi todas) entre los varios servicios es asegurada, al contrario un **nodo es parcial** si se asegura solo una fracción de las conexiones.

Es de destacar que el hecho que un nodo sea parcial no significa que no pueda ser eficaz. Imagínese que, si en un futuro se implantara el HCI en Madrid Puerta de Atocha, no fuera posible enlazar servicios entre las relaciones AVE Madrid-Barcelona con las de Madrid-Valencia. Se trataría sin embargo de una conexión de bajo interés comercial, ya que los viajeros procedentes de Zaragoza y Barcelona viajarían a Valencia respectivamente por Teruel y el Corredor Mediterráneo. Por lo tanto, no se perjudicaría el funcionamiento del nodo a pesar de configurarse como un nodo parcial.

## 4.2. Representación gráfica

La representación clásica del horario en un plano  $s-t$  en este caso no es la mejor solución, ya que se está trabajando con una red interconectada y el plano  $s-t$  se limita a representar un único eje ferroviario. Resulta por tanto conveniente representar el horario en un sencillo mapa esquemático con algunas reglas, como se detalla en la siguiente imagen.

Cada rectángulo representa un nodo de tipo :00 o :30. No existe correspondencia entre líneas dibujadas e infraestructuras reales de ferrocarriles: cada línea representa una relación comercial con cadenciamiento  $t$ . Según lo que se representa en el esquema, las dos líneas que se dirigen hacia el Oeste representan relaciones comerciales cuyos trenes pueden recorrer en un tramo el mismo eje de vía única o doble, o también líneas totalmente diferentes, algo que de esta representación no se puede deducir (se supone que sí lo sabe quien está proyectando el horario)

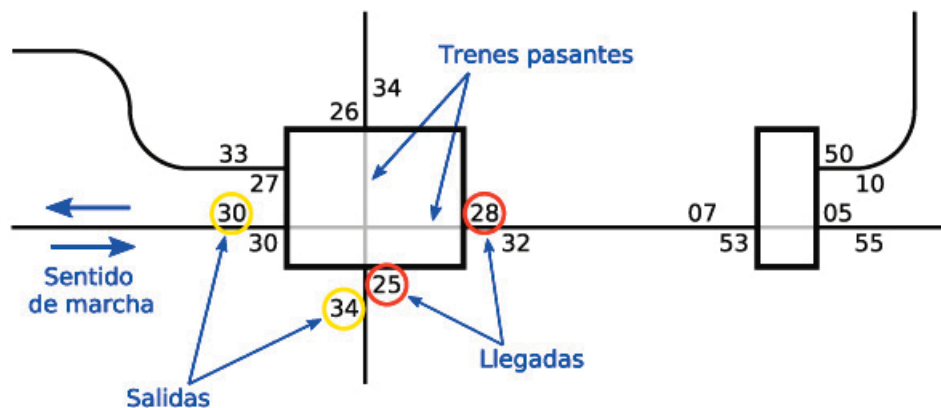


Figura 6: Representación gráfica del horario cadenciado integrado

Donde cada línea interseca el rectángulo aparecen dos números, que representan el minuto de salida y llegada de dicho tren a la estación. El número más lejos del rectángulo representa el horario de salida, y el más cercano el de llegada. Los dos números se ubican habitualmente respetando el sentido de marcha de los trenes (en España por la derecha). Dentro del rectángulo también pueden tener continuidad las líneas que llegan al mismo, para evidenciar que un tren en concreto tiene paso por la estación y que sigue hasta su destino final. (ejemplo: tren desde “Norte” llega al minuto :26, se detiene 8 minutos y sale en el minuto :34 hacia “Sur”). Por otro lado el tren hacia / desde “Oeste” que llega en el minuto :27 y sale en el minuto :33 tiene origen y destino en esta misma estación.

### 4.3. Metodología general

Como ya se ha comentado anteriormente, no existe una metodología exacta para la elaboración de un HCI. Se exponen a continuación unos principios que tienen una validez general en la redacción del mismo.

#### 4.3.1. Nodos en grandes estaciones

En estaciones término de gran importancia resulta frecuentemente imposible concentrar salidas y llegadas en un intervalo muy pequeño, principalmente por las limitaciones en los movimientos de entrada o salida en la cabecera y por la cantidad de tráfico que confluyen en la estación.

Otras razones hacen también imposible establecer conexiones muy cortas en grandes estaciones:

Una estación de gran importancia, que puede ser además parcialmente o totalmente en fondo de saco, es en muchos casos origen / destino de la mayoría de los trenes que prestan servicio en la misma, con lo cual puede hacerse necesario un mayor tiempo de estacionamiento para otras operaciones, como las de limpieza, si se pretende reutilizar el mismo material.

Los trayectos peatonales tradicionalmente más largos, y la obvia mayor dificultad del viajero en el proceso de búsqueda del propio tren y del propio andén, hacen conveniente aumentar el tiempo mínimo de transbordo que se adoptaría en el estudio del horario.

La conclusión que se deduce de estos condicionantes, es que en caso de estudiar la ubicación de un tren en un mallado, si éste atraviesa un nodo periférico y uno central, resulta en general conveniente privilegiar la construcción de un nodo total, eficaz y con un tiempo de espera mínimo en el nodo periférico.

#### 4.3.2. Nodos periféricos

Excluyendo las grandes terminales, se analiza ahora una estación de tamaño medio y pequeño que es punto de cruce de dos o más líneas, y en la que se aborda el estudio de la viabilidad de su funcionamiento como nodo de conexión.

La estación dispondrá en general de una variedad limitada de relaciones comerciales, y resulta por lo tanto conveniente minimizar los tiempos de conexión entre ellas al no existir las mismas limitaciones de las grandes estaciones. Para poder asegurar una conexión es necesario un tiempo mínimo entre llegada de un tren y salida de otro, que varía en función de diversos factores, entre ellos:

**Recorrido necesario para el transbordo:** la posibilidad de operar un transbordo en el mismo andén reduce el tiempo mínimo necesario para un transbordo, pudiéndose reducir hasta 2-3 minutos si se cuenta con cierta puntualidad de los servicios. En casos donde es preciso un cambio de andén, es conveniente adoptar un tiempo de transbordo mínimo de 4-6 minutos dependiendo de la configuración funcional de la estación.

**Puntualidad:** la puntualidad media de los trenes puede influir en los tiempos de conexión, ya que en principio una conexión para ser eficaz debe garantizarse también en caso de retraso.

En los ejemplos a continuación se ha adoptado como tiempo mínimo de conexión *4 minutos*. Pueden plantearse diferentes escenarios, según se quiera priorizar una relación respecto a otra, o bien no privilegiar ninguna.

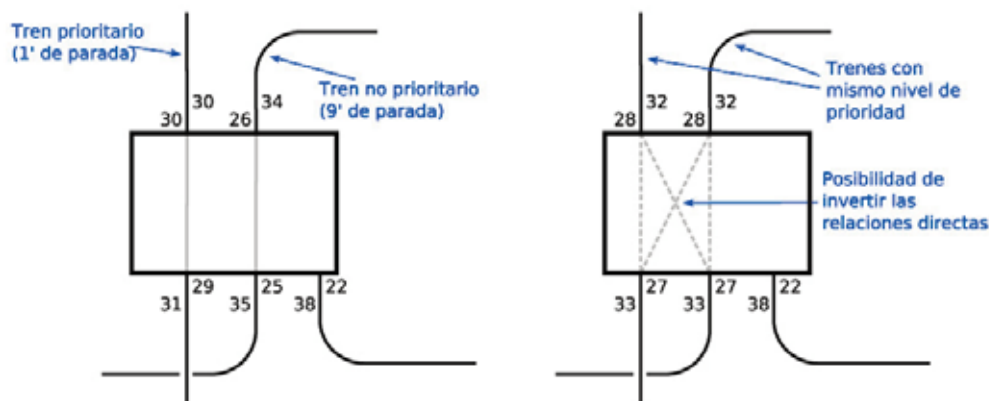


Figura 7: Distintas opciones de asignación de prioridad en un nodo total periférico.

*En la imagen de la izquierda está representado un caso donde se ha considerado prioritaria una relación comercial asignándole un tiempo de parada de sólo un minuto. Para poder asegurar los tiempos mínimos de conexión el otro tren deberá llegar unos minutos antes y salir unos minutos después, con un tiempo total de parada de 9 minutos. A parte de ellos hay otra relación con origen / destino en la misma estación, que llega en el minuto :22 y sale en el minuto :38 asegurando así todas las conexiones. Este escenario en la realidad podría ser aplicado a una conexión entre largo recorrido (tren prioritario) y tren regional (penalizado), o para una relación regional que por distintas razones necesite prioridad (relación con alto nivel de ocupación, necesidad de limitar el tiempo de recorrido dentro de 30-60-90-120 minutos, etc.)*

En el caso a la derecha se ha optado por no privilegiar a ninguna relación. Las dos relaciones comerciales tienen llegada en el minuto :27 en sentido norte y :28 en sentido sur, y salida en los minutos :32 y :33, con parada comercial de 5 minutos. Cabe recordar que se debe disponer de una infraestructura con vías e itinerarios suficientes para estas entradas y salidas simultáneas. Este escenario ofrece además una opción de explotación interesante: ya que ambos trenes tienen hora de llegada y salida idéntica o parecida, los trenes pueden intercambiarse de destinos en horas alternas, sin producir variaciones en el horario, tal y como aparece en la imagen con una traza discontinua. También es deseable que los transbordos puedan tener lugar en el mismo andén, lo que permitiría reducir sustancialmente los tiempos de transbordo.

#### 4.3.3. Nodos parciales

En casos frecuentes no siempre resulta posible concentrar todas las llegadas y salidas alrededor de un eje de simetría. Pueden configurarse nodos donde una llegada se produce después del punto de simetría (:00 o :30), que conlleva por la propiedad de simetría también una salida antes del punto de simetría en sentido contrario. En estos casos el nodo puede llegar a funcionar como nodo parcial, asegurando solo una parte de las conexiones, o haciendo posibles otras pero con tiempos de espera mayores. El gráfico a continuación representa un ejemplo de los efectos que se producen en este caso, donde la relación “anómala” es la A-B.

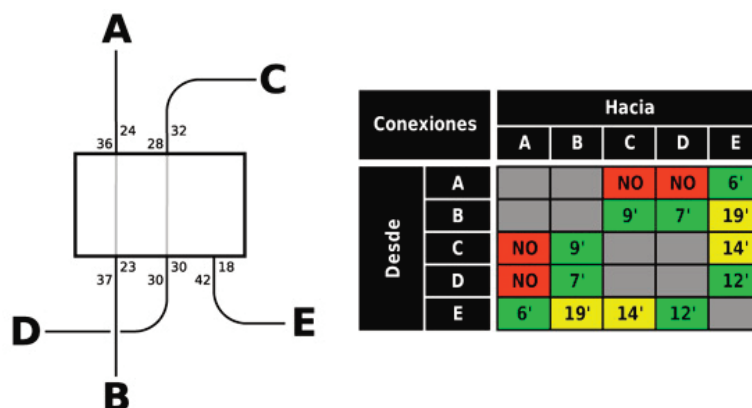


Figura 8: Ejemplo de funcionamiento de un nodo parcial.

Las conexiones A-C y A-D se van a perder en ambos sentidos; la conexión B-E y en menor medida la C-E no son óptimas y pierden parte de su potencial de captación, ya que aumenta su tiempo de espera. Sin embargo todas las demás conexiones (B-C, B-D, A-E, D-E) están garantizadas, por lo que se puede afirmar que el nodo mantiene su efectividad. Cabe destacar que no siempre un nodo con estas características implica que se pierdan algunas conexiones. Con un ajuste de horarios, siempre respetando las reglas de simetría, es posible que se puedan garantizar todas las conexiones, generando en algunos casos un aumento de tiempos de espera.

#### 4.3.4. Uso de otros ejes de simetría

Puede ocurrir frecuentemente que en un nodo/estación concreto coexistan varios ejes de simetría, con diferencias del orden de los 1-5 minutos. El mantenimiento riguroso del mismo eje de simetría es un caso teórico, en el que los tiempos de recorrido de todas las relaciones y en ambos sentidos de marcha son idénticos, no solo en total, sino en todos los subtramos entre paradas sucesivas. Esta condición en la explotación real ocurre muy raramente, por distintos factores:

- Los “colchones” de horario, es decir, los márgenes adicionales de tiempo que se añaden al horario respecto a la marcha teórica, no se suelen añadir de forma homogénea.
- En tramos con fuertes pendientes en un solo sentido, los tiempos de recorrido pueden ser diferentes entre un sentido y otro.
- Interacciones con la explotación de otros trenes fuera del sistema cadenciado, que conllevan por ejemplo adelantamientos o cruces en un solo sentido de circulación.

Los efectos de las desviaciones entre ejes de simetría son parecidos a los de un nodo parcial, es decir, algunas conexiones pueden perderse o ver aumentar su tiempo de espera, como en el siguiente ejemplo.

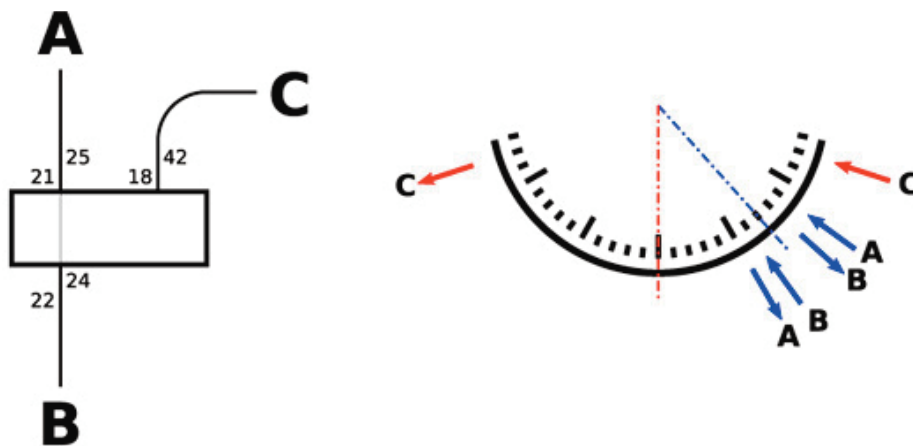


Figura 9: Ejemplo de funcionamiento de un nodo con diferentes ejes de simetría

En este caso en el mismo nodo total (ya que se cumplen todas las conexiones), coexisten un eje de simetría en el minuto :30 (relación con C) y otro eje en el minuto :23 (relación A-B). En este caso se afecta a los tiempos de transbordo A-C y B-C, que valen respectivamente 21 y 18 minutos.

## 5. Casos reales

### 5.1. Schleswig – Holstein (Alemania)

La región (Land) de Schleswig – Holstein se encuentra en el extremo norte de Alemania, en la frontera con Dinamarca. Por el lado sur, se extiende hasta las afueras de la ciudad de Hamburg, si bien ésta no es parte de la región y constituye una región autónoma. Los núcleos principales de la red ferroviaria en Schleswig-Holstein son Lübeck Hbf, Neumunster y Kiel Hbf. Sin embargo la ciudad de Hamburg es el principal centro de generación y atracción de tráfico para la región de Schleswig-Holstein, al ser una de las áreas metropolitanas más pobladas de Alemania.

En el esquema de la Figura 10 se han representado sólo los trenes regionales que son parte del sistema de horario cadenciado, existiendo obviamente otras relaciones que por distintas razones no pueden formar parte del sistema horario cadenciado, como:

- Relaciones puntuales, es decir, que se realizan entre dos puntos con una frecuencia de 1-2-3 trenes diarios, casi siempre de largo recorrido.
- Refuerzos aislados en hora punta.
- Otras relaciones con origen/destino Hamburg, que sirven para intensificar las frecuencias en las áreas de mayor demanda cercanas a Hamburg.

La red en examen es un buen ejemplo de HCI, y se puede apreciar la existencia de varios **nodos totales**. La contrapartida de un sistema de este tipo es que **se producen en algunos casos estacionamientos en nodos totales del orden de los 5-10 minutos, necesarios para asegurar todas las conexiones, pero penalizando el tiempo de recorrido de relaciones pasantes**. Por lo tanto, este sistema se considera más adecuado para escenarios con varias relaciones regionales con igualdad de prioridad.

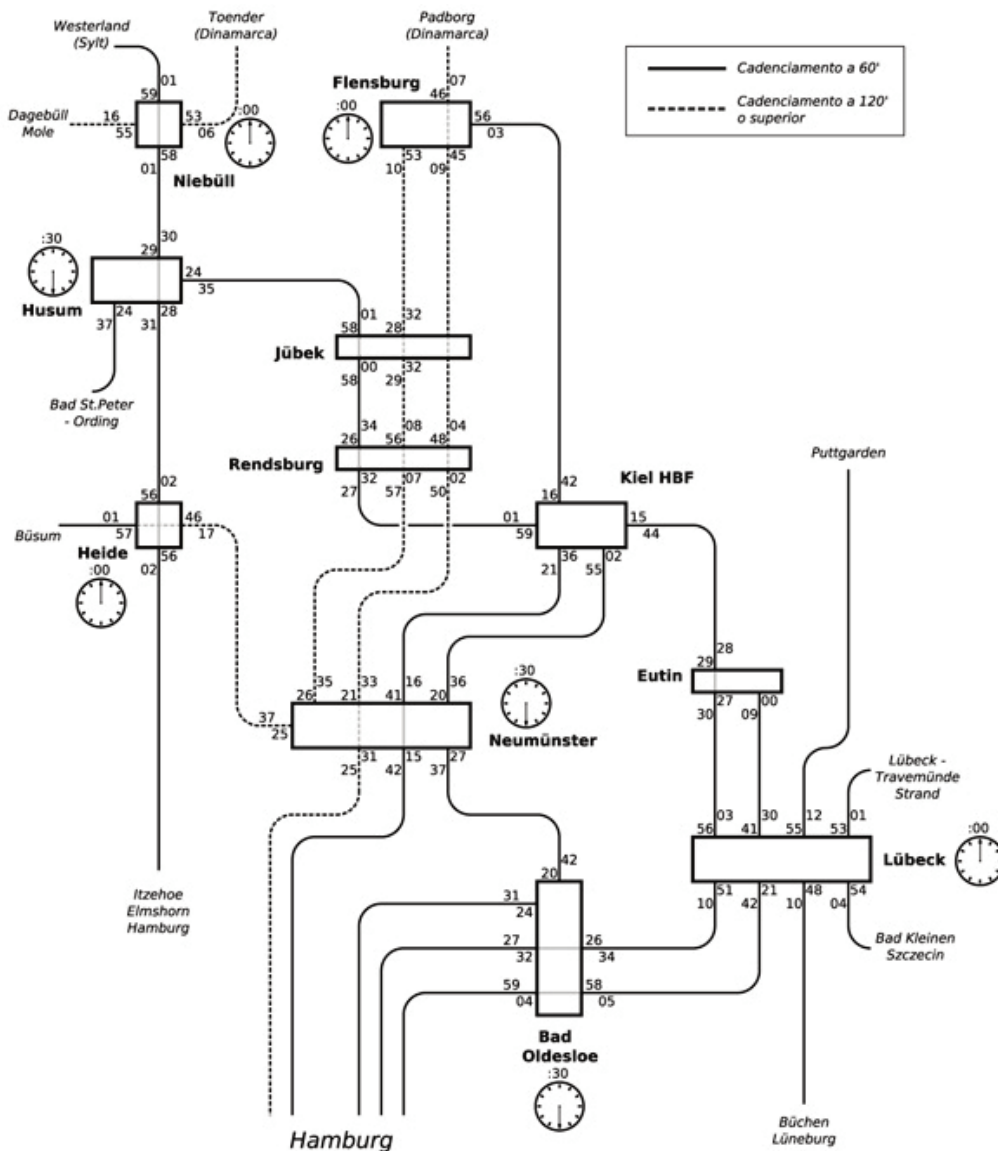


Figura 10: Esquema de horario cadenciado integrado en la red ferroviaria de la región de Schleswig – Holstein, Alemania.

Éste precisamente es el caso de la región de Schleswig – Holstein, donde la mayoría de las relaciones son de tipo regional, existiendo relaciones puntuales de largo recorrido (a Kiel, Westerland (Sylt) y Puttgarden (donde los trenes son embarcados hacia Dinamarca). Como ejemplo, se muestra como un viajero puede ir de Lübeck a Heide utilizando tres trenes diferentes, con enlaces en las estaciones de Bad Oldesloe y Neumünster:

**Salida de Lübeck en el minuto :10 y llegada a Bad Oldesloe en el minuto :26.** Existe otra relación que sale en el minuto :42 pero no es óptima para un transbordo en Lübeck. La función de este segundo tren es simplemente ofrecer una frecuencia de un tren cada 30 minutos en el corredor Lübeck – Hamburg.

**16 minutos disponibles para transbordo en Bad Oldesloe**

**Salida de Bad Oldesloe en el minuto :42 y llegada a Neumünster en el minuto :27.**

**10 minutos disponibles para transbordo en Neumünster.** La estación de Neumünster es un nodo importante de la red de Schleswig – Holstein, y ofrece varias otras conexiones, a Hamburg, Flensburg, Kiel, y Heide.

**Salida en el minuto :37 de Neumünster y llegada a Heide en el minuto :46.** Es de destacar que la frecuencia de los servicios entre Neumünster y Heide es sólo biliaria, al contrario de las relaciones anteriores que son horarias. Obviamente el viajero debería haber consultado los horarios anteriormente para evitar llevarse una sorpresa en Neumünster y descubrir que su tren sale sólo en la hora siguiente.

### 5.1.1. Carencias

En el sistema cadenciado integrado de la región de Schleswig – Holstein pueden encontrarse principalmente dos defectos:

- Kiel Hbf no funciona como nodo
- Falta de conexiones en Jübeck y Rendsburg

La razón de la imposibilidad de planificar un nodo en Kiel Hbf ha de buscarse en el sistema Neumünster - Bad Oldesloe - Lübeck. Hay que destacar que Neumünster y Lübeck son respectivamente la cuarta y segunda ciudad más pobladas de Schleswig-Holstein, con aproximadamente 78000 y 211000 habitantes. Actualmente no existe una relación ferroviaria directa entre estas dos ciudades y el trayecto se realiza siempre con un transbordo en la estación de Bad Oldesloe. Los tiempos de recorrido en los dos trayectos parciales son:

- Lübeck Hbf - Bad Oldesloe: 17' (< 30)
- Bad Oldesloe - Neumünster: 45' (< 60)

Para que este sistema de conexiones funcione, Lübeck Hbf y Neumünster deberán necesariamente ser dos nodos diferentes, es decir, un nodo :00 y el otro :30.

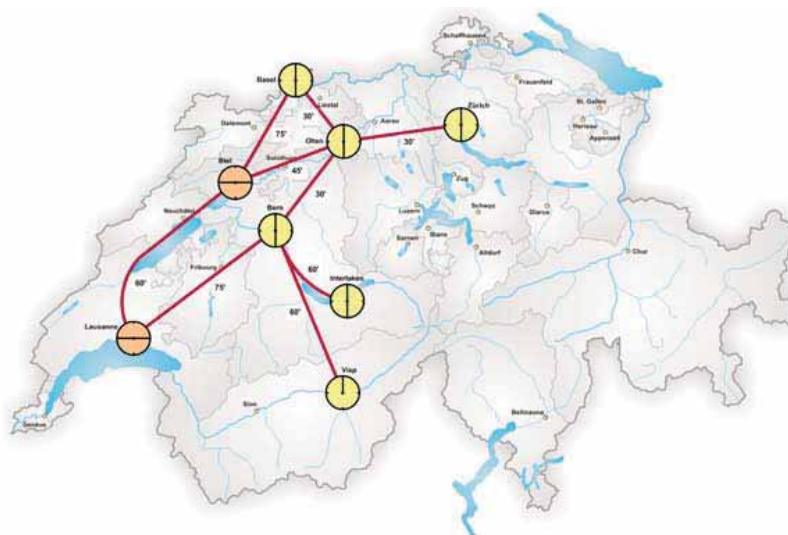
Con este condicionante se va ahora a analizar el posible nodo de Kiel Hbf. El tiempo de recorrido entre Kiel y Neumünster es de 25 minutos, y entre Kiel y Lübeck es de 1h12'. Se llega entonces a un absurdo similar a lo expuesto en el apartado 5.2, porque según se mire la relación con Neumünster o con Lübeck, Kiel Hbf debería definirse respectivamente como nodo :00 o nodo :30.

Así en la planificación se renuncia a establecer un nodo total en Kiel Hbf, prefiriendo privilegiar las

conexiones más al sur entre Neumünster, Bad Oldesloe y Lübeck. Todo ello no impide configurar un horario para permitir algunas conexiones puntuales en la estación de Kiel Hbf. En el caso de Kiel se ha hecho posible por ejemplo un enlace Flensburg – Kiel – Neumünster – (Hamburg) con un tiempo de conexión de 5 minutos, y otro enlace Neumünster – Kiel – Eutin con un tiempo de conexión de 6-8 minutos.

## 5.2. Olten (Suiza)

La estación de Olten es uno de los puntos neurálgicos de la red ferroviaria suiza. Su importancia como nodo de tránsito e intercambio ha incrementado sustancialmente con la apertura de la nueva línea de alta velocidad entre Berna y Olten y del nuevo túnel de base del Loetschberg. Tal y como se planificó en el plan *Bahn 2000* (algo equivalente al PEIT de nuestro país), la inauguración de estas líneas permitió limitar los tiempos de recorrido Bern-Basel y Bern-Zürich dentro de los 60 minutos, crear un sistema cadenciado integrado a 30 minutos, y dentro de este convertir Olten en un nodo de conexión de tipo :00/:30. En el mapa siguiente se muestra el sistema cadenciado integrado en vigor desde el año 2007.



**Figura 11: Sistema cadenciado integrado en vigor en Suiza desde el año 2007**  
(autor: Bernese\_media)

Los horarios de la estación de Olten se muestran en la figura a continuación. Por comodidad, se han representado los minutos suponiendo que el sentido de circulación sea por la vía derecha, para mantener homogeneidad de representación con los demás ejemplos (en Suiza el sentido de circulación habitual es por la vía izquierda).

Aún sin disponer del mapa de la Figura 11, se puede deducir que Olten funciona como un nodo del tipo :00/:30. Analizando las relaciones de largo recorrido, se puede notar una relación pasante Bern-Zúrich sin parada intermedia, que se ha representado en el nodo con dos líneas sin horarios de llegada y salida. Existe además una relación semihoraria directa entre Bern y Olten, y una relación Biel - Zúrich, efectuada con trenes basculantes ICN, cuyas llegadas y salidas se desvían en unos 10 minutos del eje de simetría. A éstas hay que añadir dos relaciones interregionales entre Olten y Zúrich, que sin embargo no tienen parada intermedia entre las dos ciudades y realizan por lo tanto un servicio más parecido al largo recorrido.

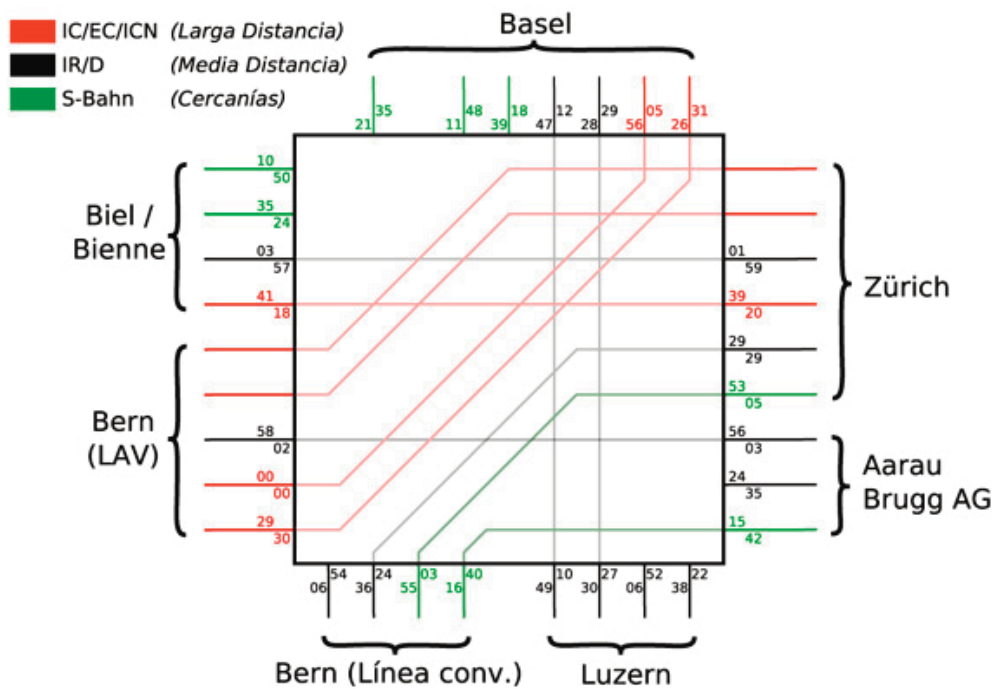


Figura 12: Esquema de horario cadenciado integrado en la estación de Olten, Suiza.

Exceptuando entonces la relación ICN, se puede apreciar como los minutos de llegada y salida de las relaciones de largo recorrido se concentran sorprendentemente en los minutos :00 y :30. La consecuencia más evidente es la imposibilidad de realizar transbordos entre dos trenes de largo recorrido en la casi totalidad de los casos, al no disponer de un colchón mínimo de 4-5 minutos para efectuar el transbordo. Sin embargo, en este caso la estructura de los horarios de largo recorrido no resta funcionalidad al sistema: en efecto, un transbordo entre dos trenes de largo recorrido en Olten es en la mayoría de los casos inútil, dado que existen otros enlaces directos entre las ciudades de Basel, Zürich, Luzern, Bern y Biel/Bienne. Estos enlaces no son representados en el esquema anterior, ya que no tienen paso por Olten, exceptuando la relación pasante entre Bern y Zürich.

Al contrario, la potencialidad del nodo de Olten se aprecia estudiando los horarios de las relaciones regionales y de Cercanías: la gran mayoría de ellas tiene unos horarios de llegada entre los 5 y 10 minutos antes del eje de simetría, y salida entre los 5 y 10 minutos después del eje de simetría. Con unos horarios estructurados de tal manera, el nodo funciona de forma eficaz para agilizar la conexión de relaciones de largo recorrido con regionales y Cercanías. En otras palabras la estación de Olten no funciona como un nodo total, sino que privilegia el transbordo entre distintos niveles de transporte, agilizando el acceso a las relaciones rápidas desde aquellos núcleos periféricos que gozan de un servicio únicamente de regionales y de cercanías.

A todo esto, hay que añadir otro aspecto interesante, que es la posibilidad de realizar conexiones (no representadas en el esquema) con el transporte público local: dado que el esquema de simetría :00/:30 es algo consolidado a lo largo de los años, también los demás horarios de autobuses urbanos e interurbanos con tránsito o cabecera en la estación se han adaptado “a remolque” a los horarios ferroviarios, minimizando los tiempos de conexión.

En resumen, este esquema de explotación reproduce a mayor escala el ejemplo representado en la Figura 7, donde se privilegia una relación prioritaria (largo recorrido) a costa de otra (regional), y es

uno de los más habituales en Suiza, dado que su mismo concepto se ve aplicado en otros nodos como Bern, Zürich y Basel. A la vez esta manera de concebir un nodo es una de las más eficaces, ya que permite conexiones entre distintos servicios regionales, o bien entre éstos y largo recorrido, sin afectar a los tiempos de viaje de estos últimos. El mayor condicionante es que debe existir demanda suficiente para establecer numerosas conexiones directas de largo recorrido, y por tanto renunciar, salvo casos puntuales, a conexiones entre trenes de largo recorrido.

## 6. Justificación del horario cadenciado integrado

### 6.1. Ventajas

#### 6.1.1. Explotación

Cualquier servicio de transporte público supone un coste de explotación para la operadora de transporte, que depende entre otros factores de la producción en términos de *trenes\*km*. Por otro lado la calidad de servicio percibida por el usuario depende de distintos parámetros, entre ellos frecuencia, tiempo de viaje total, confort, puntualidad, precio.

Por ello, tiene sentido el estudio de la viabilidad de cualquier medida que pueda mejorar la calidad del servicio en relación al coste de explotación. Entre estas medidas se puede incluir el HCI, que aprovecha un punto de fuerza del ferrocarril que es la sencillez en planificar conexiones entre distintos servicios, gracias a su discreta puntualidad y a la posibilidad de efectuar numerosas paradas intermedias. La implantación de un HCI puede conllevar:

- La disminución del tiempo de viaje total en una relación con transbordo, ya que su objetivo es minimizar el tiempo de espera intermedio.
- El aumento de las frecuencias ofrecidas al viajero, y en particular en caso de trayectos con origen o destino en núcleos secundarios, gracias a la conexiones que multiplican los trayectos disponibles.

En resumen, el **horario cadenciado integrado influye directamente en la calidad del servicio percibida por el viajero, actuando**, de los parámetros de calidad antes citados, **sobre frecuencia y tiempo de viaje total**.

Además de estas ventajas cuantificables en valores concretos, existen otras consecuencias menos tangibles, pero no por ello de menor importancia. En primer lugar, **el HCI va exactamente en la dirección de paliar la mayor deficiencia del transporte público frente al vehículo particular, que es la flexibilidad**, en el sentido de mayor frecuencia y mejor cobertura del territorio. De hecho, las mejoras en el nivel de servicio son más notables en aquellas áreas con peores frecuencias de paso de los trenes: si en una estación de cruce entre dos líneas hay una frecuencia para cada servicio de apenas dos horas, es fundamental que el viajero que quiera cambiar de tren tenga un tiempo de conexión más cercano a los 10 minutos que a los 110 minutos. Al contrario, un viajero del núcleo de Cercanías de Madrid probablemente no podría siquiera apreciar la introducción de un HCI, al disponer de un servicio con frecuencias muy elevadas. Así, unir dos, tres, o más relaciones en un HCI puede convertir las mismas en rentables cuando éstas, operadas singularmente, no lo serían (o justificar su subvención al limitar el déficit de explotación dentro de valores razonables).

### 6.1.2. Coordinación con el sistema de transporte público local

Otro aspecto a considerar, como ya se ha comentado en el ejemplo de Olten, es que si existe un compromiso en consolidar el HCI a lo largo de los años (ejemplo que se puede apreciar en Suiza, Alemania y Holanda), el transporte público local puede coordinarse con los nodos: los horarios de Cercanías, tranvías, autobuses urbanos e interurbanos con tránsito o cabecera en la estación se adaptan con un “efecto dominó” a los horarios ferroviarios. Este aspecto, junto con una adecuada información al ciudadano/usuario, es fundamental, ya que la introducción del HCI se acompaña en muchos casos con un aumento de la producción en *trenes\*km* y del coste de explotación global, y por lo tanto se busca también un aumento del volumen de viajeros transportados. El mensaje que se transmite al ciudadano a través un HCI, es que al coger un autobús o un tren de Cercanías cerca del propio domicilio, no se sube en un simple medio de transporte, sino que se está utilizando un sistema completo e interconectado, y que al llegar a una estación de mayor importancia, se tendrá a disposición una multitud de opciones de viaje a diferentes destinos y sin esperas excesivas.

### 6.1.3. Desarrollo de la infraestructura y planificación de inversiones

En administraciones como Suiza y Alemania, donde el uso del HCI está consolidado desde hace años, **la misma planificación de mejora de la infraestructura se mezcla con el diseño de los horarios futuros**. La razón consiste en que donde hay un sistema cadenciado integrado, la estructura del horario es mucho más “estática”: en ciertos casos resulta más fácil prever en qué instalaciones se pueden producir cruces, adelantamientos, y por consecuencia abordar su mejora funcional, o qué tramos necesitan prioritariamente un acortamiento de tiempos de recorrido para optimizar el funcionamiento de algunos nodos. También resulta más difícil modificar horarios de ciertos servicios que atraviesan varios nodos, puesto que los horarios de paso en éstos serán previsiblemente vinculados a enlaces con otros servicios, que podrían perderse en caso de cambios en los horarios. Al estar los horarios de distintos servicios mucho más interconectados entre sí, los cambios de horario sustanciales acaban siendo unas verdaderas “revoluciones”, que frecuentemente se deben a inauguraciones de nuevas infraestructuras, y que conllevan la necesidad de redefinir el esquema existente de nodos.

Si el sistema cadenciado integrado se consolida a nivel nacional, esto permite a los organismos que deciden sobre las inversiones en infraestructuras y la movilidad del ciudadano tener una **visión más global del sistema de transporte público**. Resulta más sencillo **identificar objetivos y estrategias, asociarlos con costes y definir prioridades**. La misma ganancia de 10 minutos en una relación puede obtenerse con costosas renovaciones de vía o de infraestructura, o con una remodelación de algunos horarios. Al contrario, pueden justificarse costosas inversiones aunque sean para una ganancia de tiempo de recorrido limitada, si por ejemplo esta mejora permite adecuar de 67 a 57 minutos el tiempo de viaje entre dos puntos, permitiendo así el funcionamiento de ambos como nodos. Asimismo, el HCI puede ser un factor determinante en operar decisiones sobre velocidades máximas de circulación en Alta Velocidad, donde pequeñas variaciones suponen grandes diferencias en términos de gasto energético.

A título de ejemplo, la nueva línea de Alta Velocidad suiza Mattstetten-Rothrist (parte del corredor Bern-Olten) se construyó con la principal intención de reducir el tiempo de viaje entre las dos ciudades a menos de 30 minutos, y el tiempo de viaje Berna - Zürich y Berna - Basilea a menos de una hora. De esta forma Berna, Zurich, Basilea y Olten se pudieron convertir en un sistema de nodos, ofreciendo cada media hora en las cuatro estaciones un gran número de relaciones con transbordos, algo que no sería posible si el tiempo de viaje hubiese sido superior.

## 6.2. Condicionantes e inconvenientes

### 6.2.1. Modulación de la oferta de transporte

Para que el HCI pueda funcionar es necesario un cadenciamiento mínimo a lo largo de todo el horario de servicio de un día tipo (tanto horas punta como medias y valle), de manera que se garantice el funcionamiento de los nodos. En casos particulares pueden preverse uno o dos “huecos” en los surcos (típicamente a última hora de la mañana y a primera hora de la tarde), pero como regla general debe existir un cadenciamiento mínimo, que es la base de la definición de los nodos. Definir este cadenciamiento en base a la hora punta sería sobredimensionar excesivamente la oferta respecto a la demanda, causando así un elevado coste de explotación. El cadenciamiento base debería al contrario poder cubrir las horas medias y valle (ocasionando en general un exceso de oferta en horas valle), atendiendo el aumento de demanda en hora punta con refuerzos que en algunos casos quedarían fuera del sistema cadenciado integrado. Para compensar los distintos niveles de demanda sin modificar las frecuencias, también se puede actuar modulando la capacidad de transporte, es decir, alternando la utilización de unidades en composición simple y doble, o variando las composiciones de trenes en caso de usar material convencional. En la misma dirección van las estrategias de *yield management*, es decir, ofrecer tarifas promocionales para inducir el viajero a utilizar trenes en horas de menor tráfico. No obstante, aunque se utilicen todas las contramedidas posibles, la experiencia demuestra que globalmente la introducción de un HCI conlleva un ligero aumento de la producción en *trenes\*km*.

### 6.2.2. Relaciones directas

El HCI puede suponer desventajas para un determinado tipo de usuario: él que viaja entre dos puntos con una elevada demanda de transporte. Para él, la introducción de un HCI sería en el mejor de los casos totalmente irrelevante. En el caso más desfavorable, puede sufrir un empeoramiento del servicio, si se ha afectado a los tiempos de viaje de los servicios para garantizar los enlaces en algunos nodos. Sin embargo, si la demanda en el corredor es suficiente para segmentar la oferta, pueden preverse servicios *express* fuera del sistema cadenciado. En todo caso, es necesario abordar este problema en una visión global de ventajas e inconvenientes: se debe y se puede asumir una pequeña afección al nivel de servicio de ciertas relaciones, si es compensada por una mejora notable del nivel de servicio de otras.

### 6.2.3. Explotación

Un sistema como el HCI en muchos casos puede hacer perder a muchos usuarios conexiones directas con algunos destinos. En contrapartida, se ofrece al usuario una frecuencia aceptable y uniforme a lo largo del día de trayectos con transbordos. Un factor crucial en la aceptación del HCI por parte de un potencial usuario, es que los enlaces sean garantizados también en caso de retrasos. Esto no suele ocurrir en caso de grandes retrasos por eventos excepcionales, donde se considera aceptable que el viajero tenga que esperar por el tren siguiente en caso de perder una o más conexiones, pero puede convertirse en un serio problema en caso de pequeños pero frecuentes retrasos (del orden de los 5-10 minutos). El compromiso a garantizar ciertas conexiones conlleva:

- Un **empeoramiento del nivel de puntualidad global** de la red de servicios incluidos en el HCI. Este empeoramiento es obviamente en comparación con la puntualidad que tendrían los mismos con un horario clásico. El efecto crece exponencialmente con el nivel de “no puntualidad” original: una red con una puntualidad excelente, no verá muy afectada su puntualidad con la adopción de un horario cadenciado integrado. Al contrario, en una red con retrasos frecuentes, estos se propagarán con un efecto dominó pudiendo llegar a perjudicar el funcionamiento global del sistema.

- Un **mayor esfuerzo de seguimiento de la explotación** tanto por el personal de tren como el de tierra. Para cada retraso de un tren con enlace, sería preciso considerar distintos factores y tras su evaluación, tomar la decisión de hacer esperar o no al tren de enlace. Se deberá tener en cuenta el número de viajeros que necesitan el enlace (si son por ejemplo 10, será preferible pagarles una indemnización en lugar de hacer esperar otro tren con 300 viajeros a bordo), los minutos de retraso, cuanto tiempo deberían esperar para el tren siguiente (una espera de 2 horas tendría mayor peso que una espera de media), si éste tiene plazas suficientes o deberían viajar sin plaza asignada, si el tren que debe esperar tiene otras conexiones, con el riesgo de causar retrasos en cadena, etc...

Un ejemplo anecdótico es el modo de gestión en los ferrocarriles suizos de los retrasos de trenes internacionales entrantes en la red. Dado que dichos trenes en muchos casos cubren surcos troncales para el HCI suizo, en caso de disponer de recursos suficientes, son capaces de disponer en un tiempo muy breve (del orden de los 30-60 minutos) un tren “sombra” que empiece su recorrido en la estación de frontera, circulando en el surco destinado originariamente para el tren internacional, y que viajará puntual asegurando así todos los enlaces en su recorrido. Esta operación puede llevarse a cabo únicamente si se conoce con suficiente antelación que el tren internacional llegará con cierto retraso. En caso de incidencias típicas en estaciones de frontera (cambio de personal, incidencias técnicas por cambio de tensión y sistemas de seguridad, controles de policía y aduana), esta solución no sería viable, porque el tren “sombra” saldría necesariamente con retraso por no disponer de tiempo suficiente para su preparación.

#### 6.2.4. Capacidad y modelo de explotación de los nodos principales

El problema quizás más relevante del HCI es que no aprovecha las infraestructuras existentes al 100% de su capacidad. En un HCI ideal, una infraestructura nodal empieza a acumular trenes entre 15-10 minutos antes del eje de simetría, y vuelve a vaciarse 10-15 minutos después del eje de simetría. Durante el resto del periodo de cadenciamento, queda vacía.

El problema ha sido adelantado en el apartado “4.3.1.- Nodos en grandes estaciones”, y conlleva que en grandes terminales sea difícil o imposible minimizar los tiempos de conexión, por las siguientes razones:

- Limitaciones de capacidad en el haz de vías, que debería disponer de al menos una vía para cada relación comercial que se quiera integrar en el HCI, además de un margen adicional para hacer frente a incidencias y puntas de demanda.
- Limitaciones de capacidad en los canales de acceso, que impiden la concentración de llegadas y salidas alrededor del eje de simetría. obligan a llegadas de relaciones regionales pasantes, que tendrán entonces tiempos de parada alrededor de los 10-20 minutos.
- Los amplios espacios que conllevan grandes distancias a recorrer por los viajeros dentro de la estación en la búsqueda del andén de salida del propio tren.
- La costumbre y necesidad de prever mayores colchones de horario en entornos saturados.

Si bien el problema de la capacidad de los canales de acceso es de difícil solución o incluso imposible, para remediar a la saturación de vías de estacionamiento puede preverse la construcción de uno o más haces de vías de apoyo en las inmediaciones de la estación.

Un posible esquema de explotación para un nodo de gran importancia es el siguiente:

**-20’/-10’:** Llegadas de relaciones regionales con término en la misma estación. En su caso, puede enviarse el material utilizado a un haz de vías de apoyo para descongestionar la estación.

**-10’/-5’:** Llegadas de relaciones regionales pasantes, que tendrán entonces tiempos de parada alrededor de los 10-20 minutos.

**-5’/+5’:** Llegadas y salidas de relaciones de largo recorrido, tanto pasantes como con inicio / término en la estación. Las relaciones pasantes tendrán un tiempo de parada lo más corto posible y ajustado al tiempo necesario para subida y bajada de pasajeros. En las relaciones con inicio / término en la estación, para el tren que inicia servicio se reutilizará el material que ha llegado la hora anterior, disponiendo así de unos 60 minutos para limpieza y puesta en servicio de la unidad.

**+5’/+10’:** Salidas de las relaciones regionales pasantes

**+10’/+20’:** Salidas de las relaciones regionales con inicio en la misma estación, pudiéndose reutilizar las unidades llegadas durante el mismo ciclo, y en su caso que fueron enviadas a la instalación de apoyo, con un tiempo de reutilización global de 20-40 minutos, compatible con este tipo de servicios.

## 7. Aspectos a considerar en la posible adopción del horario cadenciado integrado en nuestro país

### 7.1. Compatibilidad de infraestructuras existentes y en proyecto

Obviamente, también en nuestro país la planificación de nuevas infraestructuras se acompaña con estudios de explotación de más o menos detalle. Sin embargo, nuestras infraestructuras hasta ahora han sido planificadas en la inmensa mayoría de los casos basándose en un modelo de explotación diferente al del HCI, y que contempla únicamente relaciones origen/destino aisladas entre ellas.

Se detallan a continuación algunos ejemplos de infraestructuras no óptimas para un sistema cadenciado integrado.

#### 7.1.1. Una infraestructura no óptima para el HCI: Antequera – Santa Ana

Antequera – Santa Ana es una estación de Alta Velocidad, situada a 17 km al oeste del centro urbano de Antequera. Esta estación forma parte de la línea de Alta Velocidad Córdoba – Málaga, y en ella prestan servicio trenes con destino Madrid y Málaga, además de trenes de Madrid a Algeciras y Granada, con cambio de ancho en Antequera – Santa Ana. En futuro estará conectada al nuevo Eje Ferroviario Transversal Andaluz (EFT) y al ramal de Alta Velocidad a Granada. Además está conectada a las infraestructuras existentes en ancho ibérico a Ronda/Algeciras, Málaga, Granada, Córdoba y Sevilla.

La estación dispone de un total de 5 vías en ancho UIC (3 con andén y 2 de paso), y 2 vías de ancho ibérico con un andén central que da servicio a ambas. Por su particular ubicación y al ser el punto de convergencia de varios ejes de Alta Velocidad y convencionales, la estación sería un lugar ideal para establecer un nodo de conexión en ella entre varios servicios en ancho ibérico e UIC, mejorando el acceso a la Alta Velocidad desde las poblaciones menores. Desgraciadamente, **la posibilidad de realizar este servicio tanto ahora como en el futuro, es limitada por la capacidad de estacionamiento de 3 vías en ancho UIC y 2 en ancho ibérico.**

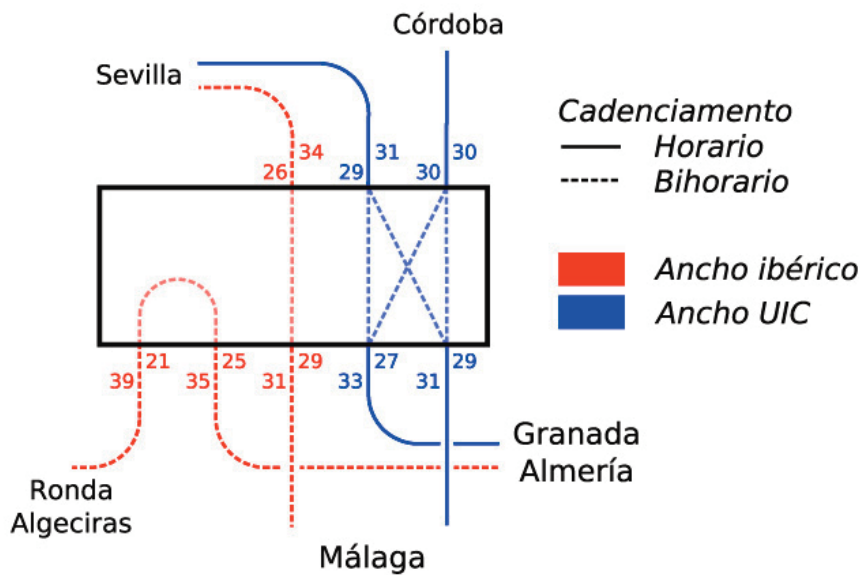


Figura 13: Escenario de explotación teórico de Antequera Santa Ana como nodo total.

Para el ancho UIC, la configuración ideal sería disponer de al menos 4 vías de estacionamiento (2 por sentido), renunciando a las vías de paso si fuera necesario, para permitir un intercambio ágil y en el mismo andén entre servicios por el Eje Ferroviario Transversal y servicios de Larga Distancia hacia/desde Madrid. El modelo de explotación con el EFT en servicio podría alternarse en horas sucesivas: en una hora dada, se produciría un transbordo entre un servicio AVE Madrid – Málaga y un Avant Sevilla – Granada, y en la siguiente hora se invertirían los destinos, enlazando un servicio AVE Madrid – Granada con un Avant Sevilla – Málaga.

En relación al ancho ibérico, se optó por dos vías de estacionamiento que serían ampliamente suficientes para los pocos tráficos diarios de las líneas convencionales de Granada/Almería, Ronda/Algeciras, Sevilla y Málaga (la línea Córdoba – Bobadilla está prácticamente en desuso, con un solo servicio por día y sentido), bajo la hipótesis de una explotación “clásica” con las llegadas y salidas distribuidas a lo largo del día. Con la introducción de un HCI, las dos vías de estacionamiento pueden ser insuficientes, al deber concentrar llegadas y salidas en los mismos minutos para permitir el enlace con los servicios de Alta Velocidad. Es de destacar que aunque estos servicios en un HCI queden con frecuencias del orden de las 2-3-4 horas, el escenario ideal consiste en que lleguen los servicios en ancho ibérico de todos los corredores a la misma hora. Para ello, serían necesarias 4 vías, o bien 2 con longitud útil mayor de la actual y suficientes para estacionar dos composiciones de Media Distancia por cada vía, con todos los condicionantes de explotación que conlleva. Manteniendo las dos vías actuales, otra alternativa es prestar servicio en horas pares con dos relaciones y en horas impares con otras dos. En este caso se salvaguarda el transbordo entre cualquier servicio de ancho ibérico con uno UIC, suponiendo que los tráficos UIC tengan frecuencia horaria, pero se perderían aquellas conexiones entre dos servicios de ancho ibérico que tienen parada en Antequera – Santa Ana en horas diferentes.

### 7.1.2. Infraestructuras excedentes

Podemos encontrarnos con partes de infraestructuras concebidas según el modelo de explotación actual, que tendrían utilización inferior o nula en el caso de un cambio progresivo al modelo de explotación del HCI. Se pueden identificar dos casos evidentes en nuestro país:

- **Cambiadores de ancho:** Una relación directa explotada con trenes de ancho variable, podría realizarse efectuando un transbordo en aquella estación donde se realiza el cambio de ancho, siempre y cuando la estación disponga de vías de estacionamiento en ambos anchos de vía. Esta forma de explotación puede conllevar ventajas adicionales, como un ahorro en el coste de explotación, al poder utilizar trenes de ancho fijo, menos caros, e incluso una mejora en los tiempos de recorrido globales, ya que los trenes de ancho fijo UIC pueden aprovechar las máximas velocidades permitidas en los tramos de Alta Velocidad.

- **Enlaces by-pass:** En correspondencia de bifurcaciones de líneas de Alta Velocidad, se han construido, o están en proyecto, vías de enlace que conectan los dos ramales de la bifurcación y configuran el nudo en forma de Y. En algunos casos no cabe la menor duda sobre la utilidad de dichos enlaces (Nudo de la Y Vasca, by-pass de Perales del Río, Nudo de La Encina). Existen sin embargo otros casos en los que la utilidad de la inversión puede parecer dudosa si se aplicara un modelo de explotación orientado al HCI. A título de ejemplo, los by-pass proyectados en Olmedo y Camp de Tarragona quedarían inutilizados en caso de prever únicamente enlaces con transbordo en dichas estaciones para los viajeros de las relaciones Galicia – País Vasco / Cataluña y Zaragoza / Lleida – Tarragona / Valencia respectivamente.

### 7.1.3. Estaciones en las afueras de las poblaciones

Una solución aplicada con frecuencia en nuestro país es optar por la construcción de nuevas estaciones de Alta Velocidad en el exterior de los cascos urbanos, con el fin de no afectar a velocidades de proyecto, evitar complicaciones constructivas, o por petición expresa de las administraciones locales. Dichas soluciones en muchos casos son inevitables y se han abordado también en el resto de Europa. Sin embargo, la diferencia sustancial con las correspondientes estaciones españolas, es que en la gran mayoría de los casos, dichas estaciones se ubican en puntos de cruce con líneas existentes, o bien se construyen posteriormente los correspondientes enlaces ferroviarios a la estación. Así, estas terminales se configuran como intercambiadores entre distintos niveles de servicio, paliando sus deficiencias de accesibilidad a la estación en transporte público. Obviamente **el uso del horario cadenciado integrado puede agilizar la creación de dichos enlaces y aprovechar la potencialidad de este tipo de estaciones.**

Entre estaciones europeas así concebidas cabe citar **Marne La Vallée – Chessy** (en las afueras de París, con intercambio TGV-RER), **Siegburg – Bonn** y **Montabaur** (en la línea de alta velocidad Colonia – Frankfurt, con intercambio con transporte regional y de Cercanías), **Kassel – Wilhelmshöhe** (al oeste de la ciudad de Kassel, en la línea de alta velocidad Hannover – Würzburg, con intercambio con transporte regional, de Cercanías, e incluso de largo recorrido convencional)

El único ejemplo nacional de una estación de Alta Velocidad periférica y con posibilidad de intercambio con tráficos regionales es **Antequera – Santa Ana**, si bien como se ha comentado antes, su potencialidad es limitada por el número de vías de estacionamiento. El resto de las estaciones no dispone de conexiones parecidas, habiendo sido diseñadas en base a un modelo de explotación diferente, y privilegiándose en la definición de su ubicación otros factores como parámetros de trazado, cercanía al centro urbano, etc.

Existen casos particulares en la red española donde una línea convencional se encuentra a escasa distancia de estaciones de Alta Velocidad, a saber:

- La estación de **Camp de Tarragona**, al lado de línea en desuso Reus – Roda de Bará. En caso de que se lleve a cabo la rehabilitación de dicha línea (eventualidad no remota), sería de gran interés para la implantación de un HCI que ésta pueda enlazar con la estación existente

de Camp de Tarragona, proporcionando así una potente conexión a la estación con tráficos de Media Distancia y Cercanías.

- La futura estación de Alta Velocidad de **Medina del Campo**, en el eje Olmedo – Zamora – Lubián – Ourense. Este eje de Alta Velocidad cruza la línea convencional Madrid – Hendaya aproximadamente 1 km al este de la ubicación de la futura estación. La cercanía de este eje vertebral de la red de ancho ibérico representa una oportunidad para el futuro, pudiéndose plantear una variante de la misma que cruce perpendicularmente la nueva estación en su cabecera este. Se permitiría así que la totalidad de las circulaciones en ancho ibérico entre Ávila/Salamanca y Valladolid puedan efectuar parada en la estación de “Medina del Campo AV”, que se configuraría como una estación-intercambiador en dos niveles.

## 7.2. Integración con la red de Alta Velocidad

Cabe comentar que el HCI es el complemento idóneo para una red ferroviaria de Alta Velocidad. Los horarios de los servicios regionales pueden estudiarse de manera que el tren regional funcione como colector o dispersor de viajeros para un corredor de Alta Velocidad / Larga Distancia, con transbordo en un nodo en concreto. Asimismo, en un trayecto entre dos nodos, un tren regional será un dispersor de viajeros procedentes del nodo anterior, y a la vez un colector de viajeros para el nodo siguiente.

Así, a través de horarios coordinados adecuadamente, se hace posible la extensión de la competitividad de los tiempos de viaje por Alta Velocidad a trayectos mixtos, evitando que tiempos demasiado excesivos de acceso a ella hagan perder su interés frente a otros medios de transporte. Aquellos núcleos de población periféricos, que no pueden beneficiarse de un acceso directo a la Alta Velocidad, gozarían de una mejora en los tiempos de viaje globales al resto del país.

## 7.3. Sistema de check-in

El sistema de acceso a los tráficos de largo recorrido en España prevé en las estaciones de tamaño grande y mediano un proceso de embarque o *check-in*, que consiste en un control de seguridad y una comprobación de estar en posesión de un título de viaje válido antes de acceder al andén. Según la normativa actual de Renfe Operadora, el acceso se cierra 2 minutos antes del horario de salida del tren. Este proceso aumenta por tanto el tiempo total de viaje para el usuario: sería además incorrecto cuantificarlo en los 2 minutos antes citados, teniendo en cuenta que es técnicamente inviable que todos los viajeros efectúen el *check-in* inmediatamente antes del cierre del mismo. Así, no cabe la menor duda que el proceso de *check-in* obliga al viajero a presenciarse con mayor antelación en la estación y aumenta el tiempo total de viaje en promedio entre todos los viajeros de un dado tren.

Comparando un trayecto directo con otro con enlace, la primera operación de *check-in* no tiene influencia en una comparación de tiempos globales, ya que se realizaría en ambos casos, o ninguno, dependiendo de la normativa. Al contrario, en caso de transbordo, **es fundamental que no haya de repetirse el proceso de check-in**, algo que impediría la realización de transbordos rápidos y afectaría demasiado al tiempo de viaje de un trayecto con enlace frente a uno directo.

Adoptar **esta medida puede hacer precisas actuaciones en aquellas grandes estaciones** que han sido diseñadas reorganizando los flujos de viajeros y separándolos entre llegadas y salidas. En algunos casos esta separación es integral, llegando a prever en el complejo un “Vestíbulo de Salidas” y otro “Vestíbulo de Llegadas”, como ocurre por ejemplo en la remodelación del Complejo Ferroviario de Atocha en Fase 1 y siguientes. En este caso, debería estudiarse la canalización de los flujos para

transbordos, evaluar si la configuración actual de la estación es compatible con éstos, y en su caso estudiar las actuaciones correspondientes. En caso de estaciones en fondo de saco y con longitudes de andenes en muchos casos superiores a los 400 metros, es obviamente recomendable que los transbordos se puedan canalizar a través de pasarelas sobre andenes o pasos inferiores, evitando obligar a los viajeros a rodear las toperas de las vías con recorridos totales de 500 hasta 1000 metros y reduciendo así el tiempo de transbordo.

#### 7.4. Puntualidad

Como se ha comentado, la introducción de un HCI conlleva un empeoramiento general del nivel de puntualidad, y en particular cuando la puntualidad originaria no es muy buena. En el ferrocarril español la situación cambia sustancialmente según el escenario que se mire: en la red UIC, el nivel de puntualidad es próximo a la excelencia, mientras en la red de ancho ibérico la situación es mucho más heterogénea.

Para la implantación de un HCI, se considera precisa por un lado **una acción continua de investigación sobre las causas de retrasos** en la red de ancho ibérico para intentar limitarlos, o bien una adaptación de los horarios correspondientes cuando esto no sea posible. Por otro lado, debería **reconsiderarse la viabilidad de mantener compromisos de puntualidad demasiado severos** para la operadora de transporte, en vista de un posible aumento de la frecuencia de pequeños retrasos debidos a enlaces.

#### 7.5. Marco normativo, competencia y rol del administrador de infraestructuras

Por imposición de la normativa tanto nacional (ley 39/2003 del Sector Ferroviario) como europea, se ha llevado a cabo la división de la antigua Renfe en el administrador de infraestructuras (Adif), y la operadora de transporte (Renfe Operadora). El objetivo de este nuevo marco legal es, entre otros, garantizar un acceso no discriminatorio a la infraestructura a otras operadoras de transporte en un régimen de competencia. Su funcionamiento es parecido a lo que ocurre en el transporte aéreo, donde las operadoras corresponden al administrador de infraestructura un canon por la utilización de la misma.

Es evidente que la facilidad de poder construir un sistema cadenciado integrado dentro de este marco normativo, y en escenarios futuros con distintas operadoras de transporte, depende en gran medida de la reglamentación del sector. En este sentido es crucial el papel que cubre el administrador de infraestructuras, como se explica en los apartados siguientes.

##### 7.5.1. Proceso de asignación de capacidad

Para favorecer la consolidación de un sistema cadenciado integrado, pueden plantearse medidas en las condiciones de acceso a la infraestructura que lo favorezcan, siempre y cuando respeten el marco normativo (acceso no discriminatorio, etc.). El objetivo de estas medidas es evitar que surcos aislados puedan afectar al funcionamiento del sistema impidiendo la ubicación de surcos cadenciados en horarios óptimos para el funcionamiento del sistema cadenciado integrado. A continuación, se representan dos ejemplos de condiciones de acceso a la infraestructura en administraciones con un sistema cadenciado consolidado.

### Alemania (DB Netz)

En la ley “Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung – EIBV” (*reglamento de utilización de la infraestructura ferroviaria*), en su apartado 9, figura que el administrador de infraestructura alemán (DB Netz) tiene poder de decisión sobre los derechos de accesos de las operadoras según el siguiente orden de prioridad:

- Tráficos cadenciados o englobados en una red
- Tráficos internacionales
- Tráficos de mercancías

Si bien la misma ley define lo que se entiende como tráfico cadenciado (al menos 4 surcos diarios, sustancialmente iguales en su recorrido, y con una cadencia no superior a los 120 minutos), no aclara el término “englobados en una red”. Esta aclaración se encuentra en otro texto legal, que es el decreto “*Verordnung zum Erlass und zur Änderung eisenbahnrechtlicher Vorschriften*”, donde se publica la primera versión de la ley antes citada y su correspondiente interpretación. En este texto, se cita textualmente que “un tráfico englobado en la red se produce en caso de conexiones con otros tráficos (relaciones con transbordos)”. En otras palabras, **tanto los tráficos cadenciados o tráficos con conexiones, aunque no sean cadenciados, tienen prioridad en la asignación de surcos** sobre todos los demás tipos de tráfico.

### Suiza (SBB Infrastruktur)

En el texto “Bestimmungen für die Bestellungen von Trassen” (*Prescripciones para la petición de surcos*), en el apartado 4.4.1.1 se cita que “en el acceso a la red, **el tráfico cadenciado de viajeros, que circule en los horarios de servicio habituales en un cadenciamiento integrado de 30, 60 o 120 minutos, y que es englobado en una cadena de transporte público, tiene prioridad**”.

#### *7.5.2. Explotación con distintas operadoras de transporte*

En escenarios con varias operadoras de transporte, la relación de cada una de las operadoras con el sistema cadenciado integrado varía sustancialmente según se trate de transporte regional (regulado y subvencionado por las comunidades autónomas) o transporte de largo recorrido (en régimen de competencia).

#### Transporte regional subvencionado

El caso de transporte regional subvencionado con distintas operadoras no presenta particulares dificultades de aplicación, y ya existe en distintas regiones de Alemania, incluyendo la región de Schleswig – Holstein descrita anteriormente. En el contrato de servicio estipulado entre las comunidades autónomas y las operadoras de transporte, se especifican todas las cláusulas necesarias para salvaguardar el correcto funcionamiento del HCI: integración tarifaria, validez de los títulos de transporte, gestión de la explotación, etc.

#### Transporte de largo recorrido en régimen de competencia

Este caso presenta mayores complejidades, sobre todo porque no existen hasta ahora ejemplos de aplicación en Europa. Las diferentes operadoras de largo recorrido que fueron constituidas en Europa (entre otras Elipsos, Thalys, Cisalpino, Artesia, Lyria, CityNightLine) son sociedades controladas por

las respectivas operadoras nacionales (Renfe, SnCF, SBB, Trenitalia, DB, etc.) y se crearon no tanto para instaurar un régimen de competencia, sino para atender con mejor eficiencia a particulares segmentos de mercado, como el tráfico nocturno e internacional.

Por otra parte, en un futuro es de suponer que existirán operadoras privadas en competencia con las nacionales. Si una de éstas desea operar con unos surcos externos al horario cadenciado, esto obviamente no supone mayores problemas para el funcionamiento del mismo. En el caso de que también la operadora privada ocupe surcos que son parte del HCI, lo más deseable es que las operadoras de transporte lleguen a mutuos acuerdos, que aseguren el correcto funcionamiento del horario cadenciado y simplifiquen el acceso al servicio por parte del usuario. Haciendo un paralelismo con el transporte aéreo, puede imaginarse un escenario parecido a los vuelos fletados en código compartido o *code-sharing*. Las cuestiones a resolver son numerosas, y se citan a continuación algunos ejemplos:

- Posibilidad de emisión de billetes únicos para trayectos con varias operadoras y/o a través de un único canal de venta.
- Si una relación se explota sin reserva obligatoria de plaza, acuerdos para que con el mismo billete se pueda utilizar trenes de ambas operadoras.
- ¿Si el tren en el surco siguiente es explotado por otra compañía, podrá el viajero utilizar este tren si ha perdido su conexión?
- ¿Hasta qué punto es conveniente que una operadora acepte viajeros de otra operadora por incidencias causadas por esta última, perjudicando así la calidad del servicio a sus clientes?
- ¿Un tren de una operadora deberá esperar la llegada de otro tren con retraso de otra operadora para asegurar la conexión? ¿Y hasta cuánto retraso? ¿Y qué compensaciones económicas se deberán reconocer?

Cuantas más cuestiones queden resueltas, más eficaz será el funcionamiento del HCI en régimen de competencia.

En todo caso, es difícil prever cual será el escenario real de explotación en cuanto entren nuevas operadoras en el mercado: con este ejemplo se pretende únicamente argumentar que el HCI puede coexistir con un régimen de competencia, si existe por un lado voluntad política para protegerlo a través de normativa adecuada, y por otro lado las operadoras son suficientemente concienciadas para llegar a acuerdos que benefician a todas las partes en causa.

---

*El presente artículo también está publicado en*

[http://ferrocarriles.wikia.com/wiki/Horario\\_cadenciado\\_integrado](http://ferrocarriles.wikia.com/wiki/Horario_cadenciado_integrado)

*Todo el contenido se distribuye bajo la siguiente licencia Creative Commons:*



*Se permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, y utilizar el contenido para hacer obras derivadas, bajo las siguientes condiciones: se debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra); si se altera o transforma esta obra, o se genera una obra derivada, sólo se puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.*

## Bibliografía

PACHL, Jorn (2008). *Systemtechnik des Schienenverkehrs. 5. Auflage*, pp. 222-236. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

REY, Georges (2007). *Entwicklung des ITF von den Anfängen bis zur Gegenwart*. Eisenbahntechnisches Kolloquium 2007, Technische Universität Darmstadt.

Reinhard Clever (1997). *Integrated Timed Transfer. A European Perspective*. Transportation Research Record 1571, pp. 109-115.

Varios Autores. *Taktfahrplan*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Taktfahrplan>

DB Netz AG. *Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG (SNB)*.

*Verordnung zum Erlass und zum Änderung eisenbahnrechtlicher Vorschriften*. Bundesratsdrucksache 249/05 del 15/04/2005, pp. 43 y siguientes

*Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung (EIBV)*. Bundesministerium der Justiz. [http://bundesrecht.juris.de/eibv\\_2005/](http://bundesrecht.juris.de/eibv_2005/)

*Network Statement 2010*. Infrastruktur Trassenmanagement, SBB CFF FFS.

*Horarios ferroviarios en Europa en la web oficial de Deutsche Bahn*. <http://reiseauskunft.bahn.de>

## Figuras

Todas las figuras son elaboradas por el autor, excepto:

Figura 9: Autor *Bernese\_media*, procedente de Wikimedia Commons







## ¿PODEMOS EXTENDER AÚN MÁS LA PERMANENCIA EN SERVICIO DE NUESTROS TRENES?

**Sí, con Refresco de Tecnología.**

Adriana Molero Alonso. Dr. CC. Físicas (AddProject)

Alberto Sols. Dr. Ing. de Sistemas e Ing. Naval (Sabentia)

Isabel Fernández Fernández Lda. CC Económicas y Empresariales

**Resumen:** La vida útil de un vehículo ferroviario, considerado en su conjunto, es muy superior al ciclo de vida de algunos de los componentes tecnológicos que incorpora. La evolución de la tecnología impone una rápida obsolescencia de algunos sistemas provocando incluso que éstos estén desfasados antes de su puesta en servicio. Para tratar de resolver este problema nace el concepto de Refresco de Tecnología con el que se pretende anticiparse a la previsible evolución tecnológica desde la fase de diseño, preparando los vehículos para que puedan incorporar fácilmente nuevas capacidades y funcionalidades que permitan prolongar su ciclo de vida útil dentro de unos niveles de actualización tecnológica adecuados.

**Palabras clave:** Refresco de Tecnología, vehículo ferroviario, ciclo de vida, mantenimiento.

**Abstract:** The lifespan of a railway vehicle, as a whole, is much longer than the life cycle of some of the technological components that incorporate. The evolution of technology involves the quick obsolescence of some systems which are outdated even before its commissioning. Trying to solve this problem arises the concept of Technology Refreshment, to anticipate the expected evolution of technology from the design phase, preparing the vehicles so they can easily incorporate new features and functionality that extend the life cycle within appropriate levels of technological upgrades.

**Keywords:** Technology Refreshment, railway vehicle. life cycle, maintenance.

### 1. También para los trenes pasan los años....

Mantener un tren en servicio durante años sin que los clientes perciban que está “viejo” y obsoleto es todo un reto. No se trata sólo de darle una capa de pintura exterior ó retapizar los asientos. Aún con estos cambios el viajero percibe, y sobretodo el operador sabe, que las “tripas”: el equipo de tracción, los motores, los sistemas de alimentación, etc, no han sido renovados.

La caja de los vehículos, con un programa de mantenimiento preventivo adecuado, se mantiene en un estado que se podría considerar muy próximo al del momento de su puesta en servicio. Los nuevos materiales de aluminio anticorrosivo están preparados para durar largos años y ofrecen las mismas funcionalidades de entonces. Sin embargo los sistemas que aloja, especialmente los sistemas electrónicos: video-vigilancia, telefonía, comunicaciones, sistemas de alarmas, etc, casi antes de comenzar a dar servicio ya han quedado obsoletos. Y esto es porque la tecnología avanza muy rápidamente, y los ciclos tecnológicos de los componentes electrónicos son muy cortos en comparación con la tecnología que soporta la caja del tren.

El tiempo (y consecuentemente el coste) de permanencia en servicio de los trenes, como de muchos otros sistemas, es muy superior al tiempo de cualquiera de sus fases anteriores: diseño conceptual, elaboración de requerimientos, fabricación, pruebas, etc.. Sin embargo sabido esto, aún hoy en día parece no tenerse en cuenta este hecho a la hora de diseñar ó adquirir un coche. Las decisiones que se toman en los estados iniciales de la vida de un vehículo determinan en gran medida qué y cómo se puede hacer a posteriori para mantener ese sistema en funcionamiento. Una de las cosas que raramente se tiene en cuenta es cómo permitir que el sistema en servicio evolucione al ritmo y a la velocidad que lo hacen los trenes que aún están en su fase de diseño. En la fase de diseño se realiza una búsqueda exhaustiva y un análisis de todas las soluciones posibles a cada requisito funcional de todo lo que el mercado ofrece: lo último, tecnológicamente hablando, que hay disponible. En ese momento el equipo de diseño se preocupa de asegurarse que su sistema incorpora todo lo que el mercado le puede proporcionar.

Paradójicamente este empeño por diseñar (ó comprar) un sistema puntero tecnológicamente no se transmite a la fase de servicio. No se percibe tal preocupación por saber cómo el tren (y subsidiariamente, el responsable del apoyo al ciclo de vida) será capaz de mantener ese estatus de estar en el top de la tecnología con el que ha comenzado su vida, en el plazo de 5, 10 ó 20 años...

Esta aparente falta de preocupación activa viene quizás heredada de tiempos pasados cuando la evolución de la tecnología no era tan rápida. Para cuando los sistemas de control empezaban a quedar antiguos, era la propia caja la que daba signos de necesitar un reemplazo. Los ciclos tecnológicos de los componentes de los sistemas de navegación, comunicación, etc han sido habitualmente inferiores a los ciclos de vida de las plataformas, pero esta diferencia no era tan importante como para generar la descompensación que actualmente existe.

Lo que pasa hoy en día es que al evolucionar la tecnología tan rápidamente, especialmente como se ha mencionado en los componentes electrónicos, antes incluso de que el sistema se ponga en servicio ya ha surgido una tecnología nueva que supera a la anterior. Esto no quiere decir que el sistema no pueda seguir cumpliendo la misión para lo que fue diseñado, pero sí que significa que el tren está perdiendo capacidades y funcionalidades con respecto a otros trenes de diseño posterior y que han podido incorporar esas nuevas tecnologías. Pierde competitividad relativa. En relación con otros trenes, se ha quedado obsoleto.

## 2. Programa de Refresco de Tecnología

Los programas de gestión de tecnología surgen pues como una reacción para combatir la obsolescencia tecnológica (y en menor medida funcional, esto es, falta de repuestos y servicio de reparación).

Se trata así de resolver el problema de la amenaza de obsolescencia tecnológica al que inevitablemente se enfrentan los trenes, y en particular sus sistemas electrónicos, pues están integrados en plataformas cuyos ciclos de vida son hasta cinco veces superiores a los sistemas que lo constituyen. Pero no sólo es cuestión de combatir la obsolescencia.

Un segundo aspecto a tener en cuenta al realizar un programa de gestión de tecnología es la incorporación de nuevas capacidades y nuevas funcionalidades. No es tanto reemplazar por ejemplo, el sistema de mando y control por otro más moderno, sino buscar la incorporación de nuevas funcionalidades que el sistema anterior no proporcionaba, como pueden ser, una pantalla táctil; una mejora en el formato y accesibilidad del registro de eventos; el despliegue de nuevos parámetros a los que antes no se tenía acceso directamente ó la integración con otros sistemas (el sistema de

comunicación, por ejemplo), etc. De este modo el programa de gestión de tecnología sí asegura que, por un lado, el tren sigue realizando en términos relativos las mismas funciones para las que fue diseñado, pero por otro, que se pone al nivel de sus “competidores”, los trenes más jóvenes que han salido de la factoría años después que él.

Un tercer factor importante a considerar al ejecutar un programa de gestión de tecnología es la mejora en el apoyo al ciclo de vida. En la literatura anglosajona esto se denomina la mejora de las “ities”, que procede del sufijo de los términos disponibilidad, mantenibilidad, fiabilidad, etc (availability, maintainability y reliability). Las “idades”, en su traducción al castellano, son un generador de coste número uno en el coste total del ciclo de vida del sistema. Por ejemplo, una tasa de fallos elevada influye en la disponibilidad del sistema, en los costes de reparación (mano de obra, talleres, repuestos, formación de personal), además de influir negativamente en el servicio a los clientes. En resumen, cuando se incorpora un nuevo componente en un programa de gestión de tecnología ha de buscarse una mayor facilidad al apoyo al ciclo de vida que necesariamente se debe traducir en un decremento del coste del ciclo de vida.

La figura 1 ilustra cómo un Programa de Gestión Tecnológica proporciona un 3x1.



**Figura 1 Beneficios de un Programa de Renovación Tecnológica**

En resumen, la gestión de la tecnología por definición es el reemplazo periódico de componentes para extender su tiempo de vida útil asegurando el apoyo del sistema a lo largo de su ciclo de vida. Si además introduce una nueva tecnología y mejora el apoyo al ciclo de vida, entonces se maneja el término Refresco de Tecnología (Technology Refreshment en su acepción anglosajona) [2]

Por último hay que tener en cuenta que la planificación de un programa de gestión de tecnología es sumamente complicada debido a la diversidad y complejidad intrínseca de la propia configuración del tren y a que inevitablemente existe un solape entre los ciclos tecnológicos entre los componentes a reemplazar [3]. La sincronización en la sustitución de los componentes exige además una coordinación con el programa de mantenimiento.

Los procesos de apoyo al ciclo de vida están relativamente bien definidos y un sistema cuando se pone en servicio tiene establecidos sus elementos de apoyo logístico integral. Los programas de refresco tecnológico, como parte integrante del apoyo al ciclo de vida, deben hacer uso de esta organización y, aprovechando esta dinámica, infraestructura, partida presupuestaria, etc, efectuar la inserción de nuevas funcionalidades y capacidades.

### 3. Diseñar para refrescar

Se ha comentado antes que aún hoy en día no es una práctica generalizada en todos los sectores el contemplar la fase de diseño cómo en 10 ó 20 años se van a reemplazar los componentes y se va a insertar nueva tecnología con nuevas funcionalidades. Afortunadamente en el sector ferroviario se encuentran muchos signos de preparación para la gestión tecnológica: p.e., en el diseño de los trenes regionales (todas las unidades diesel y más de la mitad de las eléctricas) que CAF fabrica para RENFE, aunque construidos en ancho convencional, están dotados de una preinstalación para adaptarse a las vías de alta velocidad. Así mismo en el diseño se ha considerado la modularidad de los equipos para facilitar su intercambio y mantenimiento [4].

Sin embargo es inevitable que muchos de los programas de refresco de tecnología se planteen en la fase de operación, una vez que el tren está en servicio y sus elementos empiezan a mostrar signos de obsolescencia (superados por nuevas tecnologías emergentes ó porque simplemente los repuestos empiezan a escasear peligrosamente). Es entonces cuando se percibe la necesidad de abordar un programa de refresco de tecnología.

Es tarea del responsable del apoyo al ciclo de vida durante la fase de diseño asegurarse de que el reemplazo de componentes y la inserción de nueva tecnología van a ser posible sin que esto suponga, por ejemplo, una reestructuración de la localización física de los componentes ó un rediseño del sistema que lo contiene.

No es fácil obviamente adivinar qué nos va a ofrecer la industria en el plazo de 10 ó 20 años. Qué nuevas necesidades van a surgir. Qué interfaces estarán en uso. Qué tamaño tendrán los nuevos componentes. Pero sin duda sí se pueden tomar ciertas medidas para facilitar la inserción de nueva tecnología ó de nuevas funciones y capacidades. Tales medidas son, por ejemplo: el diseño/adquisición de interfaces conforme a estándares; el uso herramientas software de arquitectura abierta que permitan su posterior manipulación para la integración con nuevas herramientas software [5] ó, como se ha visto, el diseño modular que facilite el reemplazo de componentes, etc.

En definitiva, el equipo de diseño tiene que estar integrado por personal de apoyo al ciclo de vida de modo que no se preocupe únicamente por que el tren cumpla las especificaciones de diseño sino que tiene que tener una visión a largo plazo teniendo en cuenta que el tren es un sistema vivo que va a ser modificado en mayor ó menor medida para adaptarse a nuevos requisitos y hacer uso de las nuevas funcionalidades que la tecnología le ofrece. De hecho, la evolución del tren es de tal calibre que, salvo la plataforma, la configuración inicial y la configuración final en el momento de desmantelamiento, poco tendrán en común.

### 4. Conclusión

Por tanto y a modo de resumen, se puede decir que el reto actual del Apoyo al Ciclo de Vida a los trenes con largos años en servicio es:

- Influir en el diseño para renovar;
- Vencer la amenaza de la obsolescencia insertando tecnología
  - . Ahorrando costes;
  - . Expandiendo capacidades;
  - . Aumentando funcionalidades y
  - . Mejorando el Apoyo al Ciclo de vida

Es primordial que tanto el fabricante como el operador tengan, en el momento del establecimiento de un acuerdo de adquisición de coches, una visión común de cómo abordar la inserción de capacidades y funcionalidades durante la vida útil de los mismos.

Es oportuno también que dicha actividad de inserción de nuevas tecnologías se coordine y sincronice con el programa de mantenimiento, siendo ambos parte integrante de un escalón superior que es el Apoyo al Ciclo de Vida.

## Referencias

- [1] Technology Refreshment Strategy and Plan for Application in Military Systems - A “HOW-To Systems Development Process” and Linkage with CAIV. T. E. Herald, Jr. Senior Systems Engineer Lockheed Martin Naval Electronics & Surveillance Systems. IEEE 2000.
- [2] Technology Refresh. A system Level approach to managing Obsolescence. Jeffrey Stavash. Lockheed Martin. Joint Symposium 2005. “Engineering for Affordability”
- [3] Technology Refreshment Strategy and Plan for Application in Military Systems - A “How-To Systems Development Process” and Linkage with CAIV. Thomas (Tom) E. Herald, Jr. Senior Systems Engineer. Lockheed Martin Naval Electronics & Surveillance Systems. 2000 IEEE.
- [4] Los nuevos trenes regionales de Renfe. A.R. Noviembre 2006. Via Libre
- [5] FAA COTS Risk Mitigation Guide: Practical Methods For Effective COTS Acquisition and Life Cycle Support . Gordon Shaffer. AUA-200. Oct. 2003







## INNOVACIÓN EN COMUNICACIONES TREN TIERRA

**Emte Sistemas**

**Resumen:** Emte Sistemas, adjudicatario del proyecto de la red de transmisión inalámbrica de banda ancha de la Línea 9 del Metro de Barcelona para la transmisión en tiempo real de vídeo embarcado, ha diseñado un avanzado sistema con tecnología tren-tierra de banda ancha concebida para el ferrocarril. Este artículo describe cómo es este sistema.

**Palabras clave:** Comunicaciones, video, seguridad, banda ancha, inalámbrico, metro.

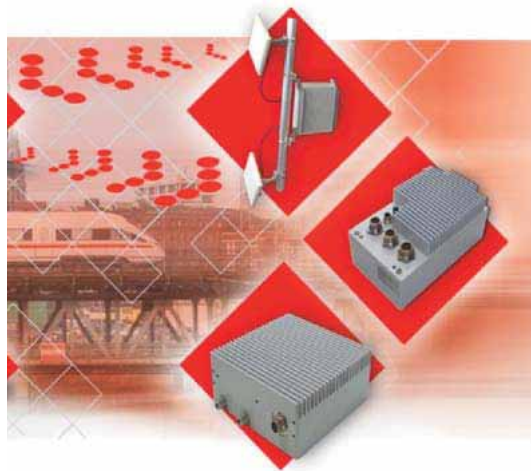
**Abstract:** Emte Sistemas is the successful bidder of the wireless transmission network project of broadband of the Line 9 of the Metro de Barcelona. This network will allow video transmission on board in real time on trains. For this purpose, an advanced system has been created with ground-to-train broadband technology designed specially for railroad. This article describes how this system works.

**Keywords:** Communications, video, safety, broadband, wireless, underground.

### 1. Introducción

Emte Sistemas se ha adjudicado el contrato de ejecución de las obras del proyecto de la red de transmisión inalámbrica de banda ancha de la Línea 9 del Metro de Barcelona para la transmisión en tiempo real de vídeo embarcado.

Para realizar este proyecto, Emte Sistemas dispone de avanzada tecnología radio tren-tierra de banda ancha desarrollada específicamente para la movilidad en el entorno ferroviario. Con esta solución, bajo un soporte totalmente IP y mediante mecanismos de calidad de servicio, ya es posible disponer de un sistema único de transmisión de radio robusto, de alta disponibilidad y fiabilidad para aplicaciones embarcadas de señalización ferroviaria, video-vigilancia, información al pasaje, distribución de contenidos multimedia en tiempo real, comunicaciones de voz, diagnóstico del tren y acceso a internet entre otros.



En la Línea 9, los operadores del centro de mando de metro dispondrán de las imágenes del interior de los convoyes a tiempo real, de la misma manera como reciben las que supervisan los andenes y otras estancias de las estaciones. Así, se mejora la seguridad de los pasajeros mientras viajan en el interior de los vagones.

Emte Sistemas, con este proyecto, presenta al mercado un sistema tecnológico que ofrece una alternativa con grandes ventajas respecto a otras soluciones inalámbricas de movilidad en WiFi.

## 2. Sistema inalámbrico de banda ancha

Como es conocido la Línea 9 del Metro de Barcelona representa, seguramente, la más innovadora obra ferroviaria de los últimos años. Emte Sistemas, empresa especializada en soluciones para el control y comunicaciones en el entorno ferroviario, ha tenido la oportunidad de implantar en los proyectos del Puesto de Control Central (PCC), la Red IP Multiservicio y en las Comunicaciones Tren Tierra de Banda Ancha varias innovaciones que dotan de mejoras y personalidad propia a la Línea 9.

En particular, respecto a las comunicaciones inalámbricas de banda ancha entre el tren y el PCC, la elección del sistema se realizó considerando:

- El entorno ferroviario y, en concreto, a lo que se refiere a los equipos embarcados: Todos los componentes radio del sistema están certificados según los estándares EN 50155 e IRIS.
- La necesidad de un sistema flexible, modular y escalable. Flexible por disponer de una arquitectura abierta y permitiendo que nuevas aplicaciones del usuario puedan ser integradas de manera sencilla y por tanto adaptando el sistema a las futuras operaciones de control del metro. Modular y escalable para permitir incorporar más elementos en el sistema haciéndolo crecer y adaptándolo a nuevas ampliaciones.
- Componentes de alta fiabilidad para lograr máxima estabilidad del sistema a largo plazo. Entre estos, el transmisor-receptor será un equipo desarrollado con la más avanzada tecnología de radio.
- Transmisión radio en la banda de 5 GHz (banda libre sin necesidad de licencia).

| Enlace                   | Rango de frecuencias en MHz |
|--------------------------|-----------------------------|
| Ascendente (hacia PCC)   | 5630 - 5710                 |
| Descendente (hacia Tren) | 5490 - 5570                 |

**Tabla 1: Espectro asignado al sistema de radio**

- Capacidad de integración de múltiples servicios en un único enlace de datos basado en la utilización del estándar IP y que a su vez garantiza una directa integración con otros subsistemas basados también en IP. Soporte de protocolos TCP/IP y UDP.
- Implantación completa de los mecanismos de Calidad del Servicio (QoS). El sistema permite que, sobre varios servicios que comparten el enlace, se establezcan diversos niveles de prioridad en función de la sensibilidad de la información para la operación del metro. También se garantiza tráficos de datos determinados con un ancho de banda específico.
- Alta transferencia de datos de hasta 32 Mbps. El sistema de radio proporciona una velocidad de transferencia de datos constante de 16 Mbps en modo full duplex en la capa física del interface aire, siendo independiente de la distancia al tren y su velocidad.
- Handover sin pérdidas sin interrupciones. Se mantiene un enlace de radio permanente entre los equipos de vía y los embarcados en el tren hasta velocidades muy altas.
- Seguridad e integridad de datos. El sistema de radio cuenta con su propia aplicación específica para la capa física (PHY) que hace prácticamente imposible el acceso no autorizado. Además se implantan cortafuegos junto a procedimientos de filtrado de las capas IP y MAC, y encriptación de 256 bits. Durante la operación todas las tramas de datos deben ser autenticadas.
- Disponibilidad de incorporar un sistema de diagnóstico y supervisión basado en el estándar SNMP que facilite el control automático de todos los componentes activos (infraestructura y embarcados) del sistema de radio.

TRainCom® MT es la solución adoptada en la Línea 9 que responde a los anteriores requerimientos y permite abordar el proyecto con otras prestaciones que lo hacen único en las comunicaciones inalámbricas ferroviarias.

### 3. Servicios sobre la infraestructura inalámbrica

En la línea 9 se han considerado inicialmente las siguientes aplicaciones:

- Video-vigilancia (visualización de video en tiempo real: cámaras del tren)
- Sistema de grabación de video (recuperación de videos grabados en los equipos del tren)
- Servicio de Información al Viajero (contenidos enviados desde el centro de mando)
- Diagnóstico del tren (información de estados)

Respecto a la video-vigilancia, desde el PCC los operadores de Metro podrán seleccionar sobre la suite de control esTRAUSS® (solución de Puestos de Control Ferroviario de Emte Sistemas) la cámara o cámaras del vehículo o vehículos que se desean visualizar en tiempo real, de manera tan sencilla como a la hora de seleccionar cámaras de las estaciones. El vehículo se gestiona desde operación como si fuera una estación más, pero en este caso móvil. Este servicio ofrece ventajas como son la protección contra el vandalismo y el aspecto atractivo para los pasajeros por la mejora de su seguridad.

El sistema de grabación de las imágenes obtenidas por las cámaras embarcadas en, prácticamente, muchas de las líneas de metro del mundo se realiza de forma local en los equipos embarcados. En la línea 9 esta funcionalidad está presente y gracias al sistema TRainCom® MT permite recuperar de los videograbadores del vehículo imágenes desde el PCC seleccionando el vehículo, la cámara, el día y la hora de la grabación. Este servicio es utilizado para poder disponer de pruebas documentales en acciones judiciales abiertas en casos de delincuencia dentro de los vehículos o para evaluar emergencias.

El sistema de información al viajero (SIV) responde a la necesidad de ofrecer a los usuarios del metro información que responde a diferentes tipos de contenidos. En el interior de los vehículos se disponen pantallas multimedia y teleindicadores que presentan la información recibida *online* a través del sistema inalámbrico de comunicaciones. El SIV es uno de los elementos más importantes a la hora de contribuir a la satisfacción del usuario: se muestra información del recorrido, recomendaciones de conexiones o rutas alternativas en caso de incidencias en el servicio de metro, permite dar soporte al viajero en caso de emergencia, presentar las últimas noticias, ayudar a la gestión del flujo de viajeros en grandes acontecimientos y ser soporte publicitario (canal de información y comercialización para la promoción de la ciudad, empresas de ventas al consumo, información turística). Con este último se abre, para el operador del Metro, una oportunidad para obtener ingresos adicionales.

La información de estados es parte del sistema TCMS (*Train Control and Monitoring System*). En la Línea 9 la transmisión de los datos de monitorización y control se distribuye entre dos redes inalámbricas de alta disponibilidad y seguridad:

- Los estados para la diagnosis del tren se conducen a través del sistema TRainCom® MT.
- Las alarmas y telemandos de explotación, seguridad y mantenimiento del material móvil, junto con la megafonía e interfonía embarcada son soportados por el sistema TETRA (red de banda estrecha).

Toda esta información se presenta integrada en el PCC sobre la suite esTRAUSS® de manera que se facilita la operación.

WiFi ATC soporta el sistema CBTC que permite la regulación y seguridad del tráfico de vehículos en la línea de metro.

Aunque en el proyecto de Línea 9 los servicios soportados son los descritos en las líneas anteriores, el sistema TRainCom® MT ha sido desarrollado bajo criterios de la alta disponibilidad, fiabilidad y seguridad. Esta filosofía de producto permite ofrecer todos los servicios que son necesarios en el desarrollo de la operación del material móvil incluidos los que son enviados vía TETRA y vía WiFi ATC-CBTC (*Communication Based Train Control*):

- CBTC que permite la regulación y seguridad del tráfico en la línea de metro con o sin operación automática del tren.
- TCMS (alarmas y telemandos de explotación, seguridad y mantenimiento, incluyendo la visualización de estados)
- Comunicaciones de voz con el conductor
- Video-vigilancia: en tiempo real y en diferido por descarga de vídeos de los equipos embarcados.
- Sistema de Información al Viajero
- Paneles: itinerario, noticias, entretenimiento, TV online, publicidad
- Megafonía (mensajes recorrido, de emergencia y hilo musical) e interfonía
- Inspección de túnel/vía mediante cámaras y sensores.
- Acceso a Internet a bordo para los usuarios a través de WiFi embarcada.

#### 4. Arquitectura de la solución de comunicaciones

La cobertura de radio es proporcionada por estaciones de radio base (RBS) a lo largo de la vía. Cada RBS comprende a un conjunto de antenas, un transceptor (BST) y un armario de conexión con fuente de alimentación e interface de acceso a red. Las RBS de un área de radio están conectadas a través de la red IP RBS-Backhaul a la Unidad de Control de Radio Descentralizada (DRCU).



Foto 1: BST del sistema TRainCom® MT

La DRCU coordina las conexiones de radio a todos los trenes que se encuentra dentro de su área de radio. Las diferentes DRCU están conectados a través de la red IP Radio-Backbone, al igual que la Unidad Central de Radio (CRCU) que es se encarga de la configuración y diagnóstico del sistema completo. Esta misma red Radio-Backbone también ofrece la interfaz de datos externos para los servicios de aplicación. La figura 1 muestra la arquitectura del sistema de radio TRainCom® MT.

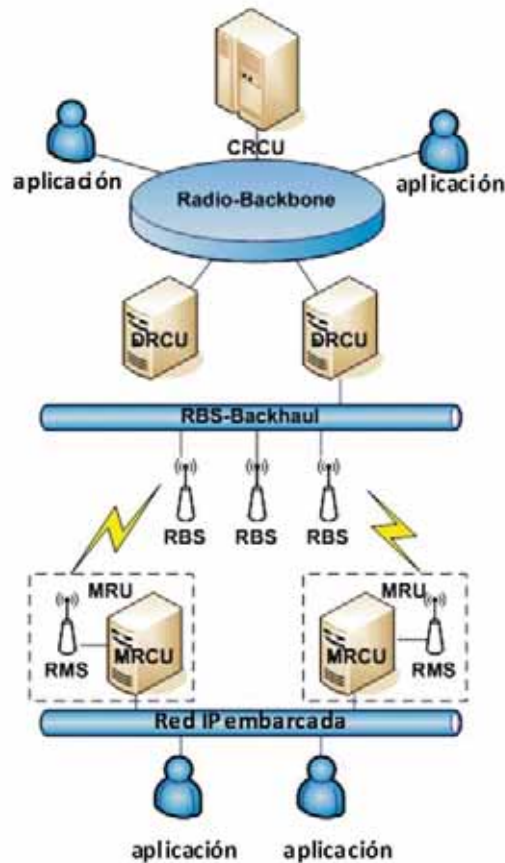


Figura 1: Arquitectura del sistema TRainCom® MT

Cada uno de los trenes equipa dos Unidades Móviles de Radio (MRU). Una MRU consta de una Estación de Radio Móvil (RMS) y una Unidad de Control (MRCU). La RMS es integrada por dos antenas móviles montadas en el techo y conectadas mediante cables coaxiales a un Transceptor de Estación de Móvil (MST). Ambos MRCU quedan comunicados dentro del vehículo a través de una red LAN que proporciona la interfaz externa para los servicios de aplicación.

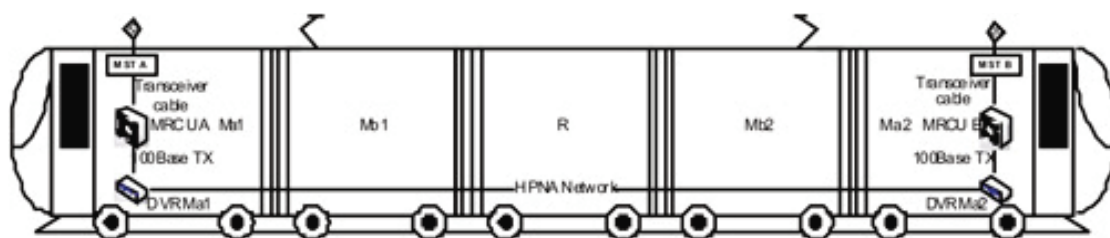


Figura 7: Equipamiento en el vehículo

La comunicación de los dispositivos que aportan la información de diagnóstico se realiza a través del bus de tren MVB (*Multiple Vehicle Bus*). En la solución embarcada de Emte Sistemas se incluye electrónica adicional que permite la adaptación mediante una pasarela entre la red Ethernet y el bus MVB.

En la solución para la Línea 9 se ha tenido en cuenta la más altas prestaciones en disponibilidad, más del 99,99% del tiempo y espacio, gracias a un diseño redundante del sistema. Este diseño asegura completa cobertura para los errores de componente único. La redundancia pivota sobre varios elementos del sistema:

- Redundancia en CRCU y DRCU. Estos equipos se montan en disposición maestro-esclavo (modo de espera en caliente) en el PCC. Para mantener la funcionalidad de la CRCU y DRCU bajo cualquier fallo de un solo componente, maestro y esclavo están conectados a distintos conmutadores redundantes. Se implementa un segundo CRCU y DRCU, copias de seguridad, en el Puesto de Control de Emergencia (PCE) que funciona como espera activa del PCC. En la figura 2 se ofrece un esquema de la arquitectura.

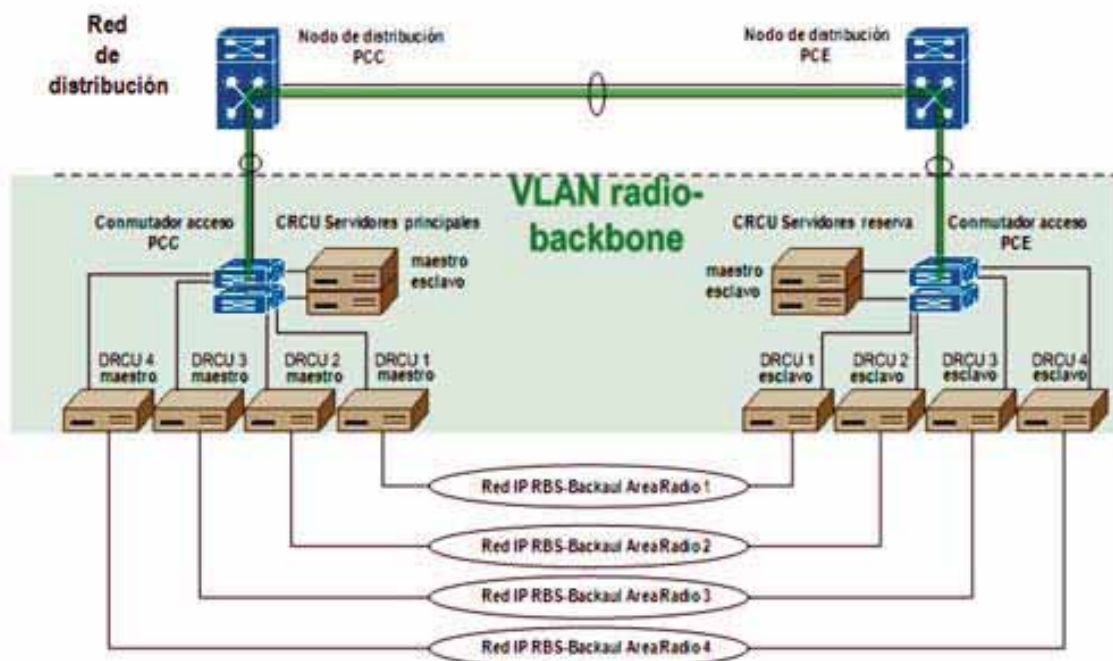


Figura 2: Arquitectura de control del sistema radio de la Línea 9

Cobertura redundante. A lo largo del recorrido del metro se dispone de una cobertura con solapamiento suficiente entre RBS adyacentes para favorecer el cambio de RBS en la comunicación móvil. En todo el recorrido se dispone de dos canales con conjuntos independientes de RBS que se implementan para llegar a alcanzar una cobertura redundante. El posicionamiento de las RBS estará sujeto a la planificación de radio realizará mediante simulación y bajo medidas en campo. En media la separación entre RBS es de 400 m. Respecto al vehículo se embarcan dos MRUs con antenas direccionales en diversidad, una en cada extremo del mismo. Cada MRU se asigna a uno de los canales de sistema. La propagación resultante, orientación y superposición se representan en la figura 3.

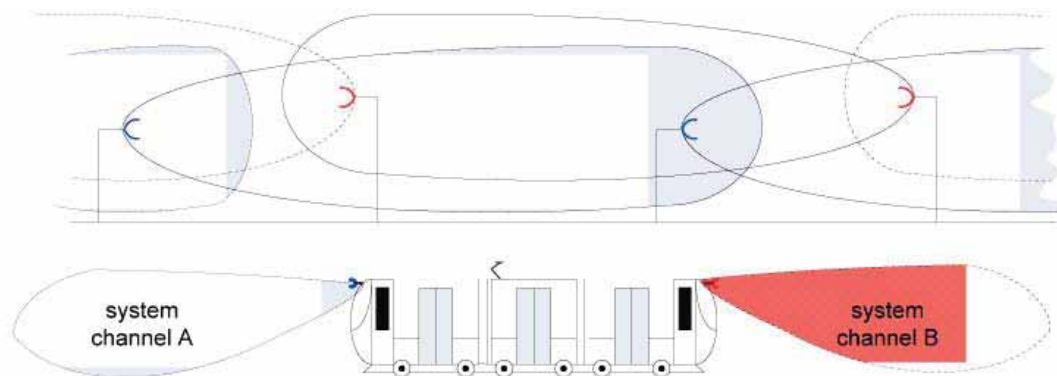


Figura 3: Cobertura de radio redundante

Las redes fijas IP sobre las que se soporta el sistema de comunicaciones inalámbricas TRainCom<sup>®</sup> MT son tres:

- Red Radio-Backbone en la que se disponen las configuraciones de CRCU y DRCU del sistema conectando PCC y PCE. Se realiza las conexiones sobre la red IP multiservicio existente en Línea 9, con todas las interfaces Gigabit Ethernet.
- Red Radio-Backhaul, sobre la que se soportan las comunicaciones de todas las RBS con las DRCUs. Las RBS instaladas en el recorrido están bajo una topología en estrella conectadas al conmutador IP de la estación más cercana. Esta conexión se realiza con una interfaz Fast Ethernet utilizando fibras monomodo. Los conmutadores IP de estaciones del sistema inalámbrico están conectados bajo una topología en anillo que permite contar con un mecanismo de redundancia reconduciendo el tráfico de la red en caso de fallo en un punto del anillo. Este anillo se conecta con las DRCUs en dos puntos diferentes del mismo. Tanto el anillo como los enlaces con las DRCUs se realiza con una interfaz Gigabit Ethernet.
- Red IP embarcada. Cada MRCU dispone de un interfaz Ethernet que permite la conexión a los videograbadores (DVR) mediante HPNA (Home Phoneline Networking Alliance).

Una prestación adicional en la solución inalámbrica de banda ancha es el incremento del tráfico de datos en cada vehículo. Gracias a disponer, según diseño redundante, de dos canales en la cobertura radio es posible que los equipos embarcados MRU trabajen en paralelo, lo que denominamos vínculo de agregación. El tráfico total de datos de radio se distribuye de forma estática en el sistema mediante el uso de los dos canales, de manera que la velocidad de datos llega hasta 16 x 2 Mbps en ambos sentidos de comunicación (tanto descendente como ascendente).

## 5. La mejor solución en comunicaciones ferroviarias en radio de banda ancha

Con el sistema de comunicaciones inalámbricas de banda ancha TRainCom<sup>®</sup> MT se ofrece una solución completa y avanzada en la Línea 9 del Metro de Barcelona, que además responde a criterios de rentabilidad. Durante la definición del proyecto se prestó especial atención en conseguir una solución muy rentable. Esta eficacia económica no sólo se limita al coste inicial de la inversión sino que también es válida para los aspectos de coste del ciclo de vida. Los aspectos principales que contribuyen a su eficiencia económica son:

- El desarrollo del sistema se adaptó a las necesidades de particulares de un proyecto de metro.
- Sistema incorporado para el diagnóstico online.
- Bajos costes de mantenimiento pues ante una avería se consigue una rápida localización y reemplazo de componentes (plug and play).
- Altos valores del MTBF para asegurar la fiabilidad y reducir malfuncionamientos.
- Alta calidad de los componentes radio.
- Reducción del tiempo entre reparaciones (MTTR) gracias a que los componentes son fácilmente reemplazables y reconfigurables.
- Amplia separación entre las RBS consiguiendo costes de infraestructura más bajos.
- Alta transferencia de datos para obtener una buena relación coste-beneficio.

Este proyecto no alcanza únicamente la red de transmisión sino que se plantea como una solución extremo a extremo, asegurando la funcionalidad de los servicios soportados en la red inalámbrica. Este aspecto ha llevado a incluir dentro del alcance una serie de equipos que son accesorios a la infraestructura del sistema TRainCom® MT pero que son necesarios para completar el nivel de aplicación de los servicios integrados. Emte Sistemas, especialista en la integración de sistemas, ha colaborado con diferentes fabricantes de hardware del entorno ferroviario para poder entregar, con éxito, una solución completa que cumple con las funcionalidades requeridas en Línea 9.

Emte Sistemas presenta, bajo la solución de radio de banda ancha aportada en Línea 9, un ejemplo real de las posibilidades técnicas, funcionales y operativas de los servicios que pueden ser integrados bajo una única red inalámbrica; en función de las necesidades y requerimientos específicos Emte Sistemas integrará a todos los niveles (embarcado, infraestructura inalámbrica y fija, aplicaciones) la solución que mejor se adapte en términos técnicos, económicos y de mantenibilidad.





Parte V  
**Energía**



## ACTUACIONES EN FGC PARA LA REDUCCION DEL CONSUMO DE ENERGIA

**José Luís Arques Patón**

Director de Tecnología y Gestión. Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya - España

**Resumen:** Aun cuando la liberalización del mercado energético ha permitido a las empresas de transporte ferroviario contener e incluso, en algún caso, reducir su factura de energía, este modelo parece agotado ante la presión de la demanda, las continuas subidas del precio del crudo y la falta de precios de referencia. Se hace, por tanto, necesario desarrollar e impulsar medidas basadas en el ahorro y en la eficiencia energética.

En lo que sigue, se describen las acciones y proyectos que FGC está llevando a cabo en este sector teniendo en cuenta que, además, en Cataluña el Programa de Ahorro y Eficiencia Energética aprobado por el Govern de la Generalitat es obligatorio para los organismos y entes dependientes del mismo<sup>1</sup>.

**Palabras clave:** Energía, eficiencia energética, ahorro de energía.

**Abstract:** Even if the liberalization of the energetic market has allowed to the companies of railway transport to contain and even, in some case, to reduce his invoice of energy, this model seems to be exhausted before the pressure of the demand, the continuous raises of the price of the crude oil and the lack of prices of reference. It becomes, therefore, necessary to develop and to stimulate measures based on the saving and on the energetic efficiency.

Later they are described the actions and projects that FGC is carrying out in this sector bearing in mind that, in addition, in Catalonia the Program of Saving and Energetic Efficiency approved by the Govern of the Autonomous government of Catalonia is obligatory for the organisms dependent on the same one.

**Keywords:** Energy, energetic efficiency, save of power.

---

<sup>1</sup> Este artículo fue presentado en las II Jornadas Técnicas que sobre Estrategias de ahorro y Eficiencia energética en el Transporte Ferroviario se celebraron en Sitges (Barcelona) los días 5 y 6 de junio de 2008, habiéndose actualizado para esta publicación.

## 1. Introducción

Se dice frecuentemente que en las empresas ferroviarias y FGC no es una excepción, la factura energética es la segunda más importante después de la del personal y aun cuando la liberalización de la energía ha permitido mantener y hasta reducir su coste unitario, la falta de un precio de referencia, la presión de la demanda y el aumento de los precios del crudo en los últimos años, ha provocado el agotamiento de este modelo de contención de los gastos de la energía basado únicamente en la mejora de su precio de adquisición. Se hace, por tanto, necesario aplicar modelos más complejos que, sin olvidar las posibilidades de conseguir un buen precio, hagan un énfasis especial en el ahorro y en la eficiencia energética que son socialmente más responsables al reducir las necesidades de combustibles fósiles (cada vez más escasos y de ahí su elevado coste) y las emisiones de CO<sub>2</sub> que tanto contribuyen al cambio climático.

A pesar de lo dicho anteriormente, la sensibilidad por la eficiencia energética ha existido siempre en FGC y así, por ejemplo, la renovación del parque de material rodante por unidades de mayor potencia instalada pero más eficientes le ha permitido reducir en un 25% el consumo específico (en kWh./c\*km) de dichas unidades durante la década de 1900 a 2000, tal y como muestra la **figura 1**<sup>2</sup>.

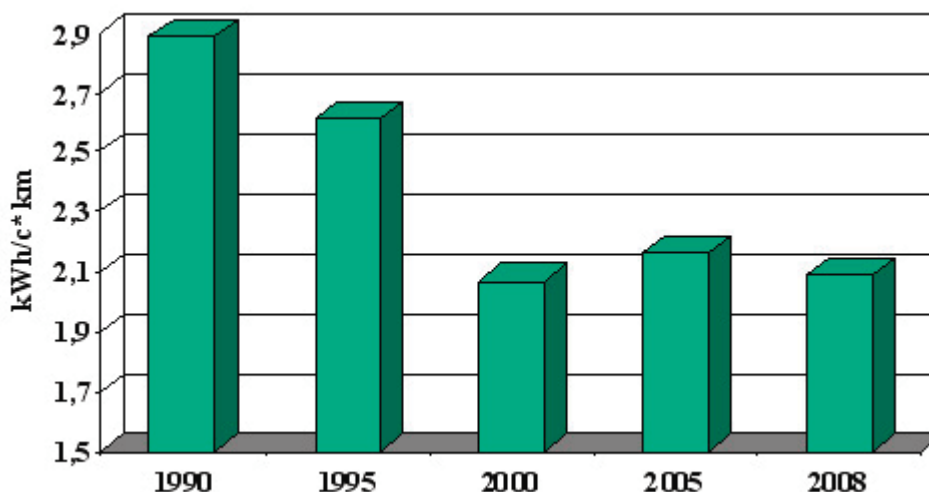


Fig. 1: Evolución del consumo específico del parque de material

En las estaciones, aunque también se han aplicado numerosas medidas, éstas no han tenido el mismo resultado que en el material móvil pues el consumo por estación no ha dejado de aumentar hasta duplicarse durante el mismo período (**figura 2**), lo cual ha sido debido, fundamentalmente, al incremento y complejidad de las instalaciones necesarias para mejorar la accesibilidad, la venta automática, el control de los accesos y la seguridad subjetiva (**figura 3**).

2 La reducción del consumo específico ha sido especialmente importante en los últimos años con la puesta en servicio de unidades con sistema de tracción trifásica.

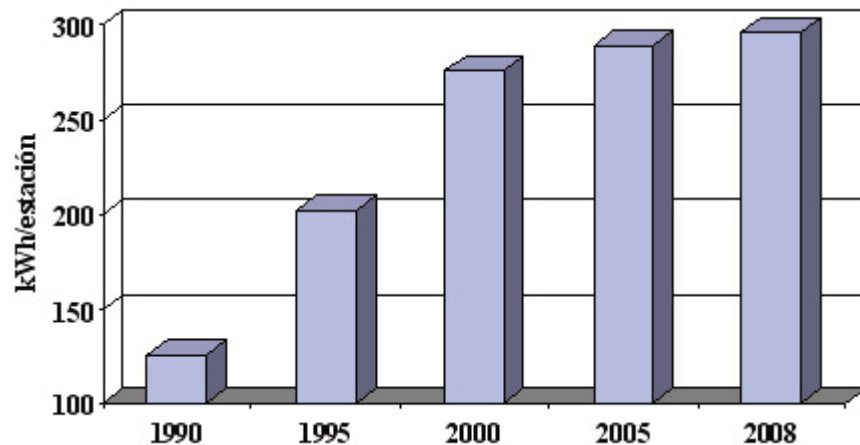


Fig. 2: Evolución del consumo anual medio de energía por estación

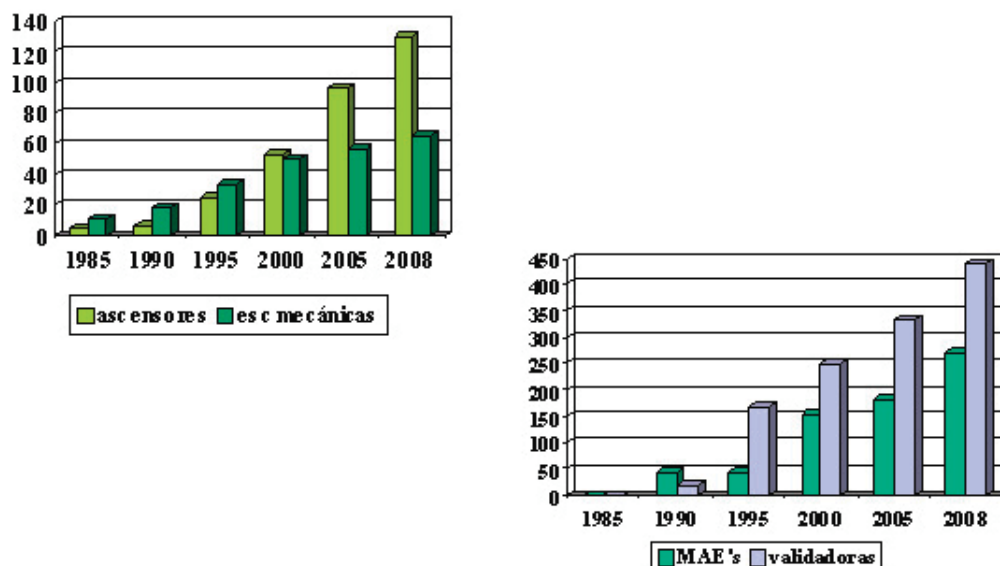


Fig. 3: Evolución anual del número de equipos existentes en las estaciones

Se hacía necesario, por tanto, impulsar nuevas políticas que ahondaran en la reducción global del consumo de la energía y no de forma local o aislada. En lo que sigue, explicaremos el plan adoptado por FGC, el cual ha merecido el apoyo del Institut Català de l'Energia de la Generalitat de Catalunya (ICAEN).

## 2. Actuaciones en el material móvil

La reducción del consumo de energía destinada a la tracción del material, mediante la renovación del parque más antiguo por material nuevo más eficiente, es un modelo cuyo ciclo es largo (los 30 o 40 años que dura cada serie de material) y por tanto, no es de aplicación inmediata. Sin embargo, FGC como cualquier otro ferrocarril suburbano, tiene un parque de material que está dimensionado para dar servicio con preferencia en las horas punta; quiere esto decir, que en las horas valle existe un

material sobrante que no presta servicio lo cual se aprovecha para efectuar la revisión de algunos trenes mientras que el resto se estaciona en diferentes puntos de la línea y aun cuando durante este período el material estacionado debería estar desconectado, no siempre lo está, por diversas razones. La posibilidad de incorporar al material dispositivos que automáticamente cierren las puertas en el caso de estar abiertas y desconecten los equipos de alumbrado y de climatización cuando la unidad esté estacionada un tiempo determinado, parece de gran utilidad para reducir un consumo de energía que no tiene ninguna utilidad para el cliente.

Otro hecho importante es que desde el punto de vista energético el equipo de tracción es una caja negra; es decir, funciona o está averiado pero nada sabemos si cuando funciona lo hace de modo energéticamente eficiente. En estas condiciones, nos hemos planteado estudiar si la evolución de la energía consumida y de la energía regenerada en cada unidad y su comparación con el resto de unidades puede servir para diagnosticar la eficiencia del equipo de tracción de la unidad durante su funcionamiento. En definitiva, deseamos investigar además, si el análisis de los consumos puede ser utilizado como predictor de posibles fallos de ciertos componentes del sistema de tracción.

En el 2006 se instaló un primer dispositivo en una unidad de tres coches (dos de ellos motorizados con motores cc y equipos chopper) y después de un período de prueba y validación se extendió a la totalidad de la serie a lo largo de 2007. En 2008, se adoptó y mejoró el dispositivo para las unidades más modernas de cuatro coches (tres coches motorizados con motores trifásicos asíncronos y onduladores directos de tensión) y actualmente, está en curso de instalación dichos equipos para nuevas unidades, con lo que a primeros de 2010 FGC tendrá equipado con este dispositivo el 39% de su parque.

Los valores obtenidos hasta la fecha con las UT-111 nos permiten afirmar que el consumo horario de una unidad estacionada con el dispositivo de ahorro de energía activado es un tercio del consumo de una unidad estacionada sin dispositivo de ahorro o si éste está inactivo. El ahorro de energía directamente obtenido durante los meses de funcionamiento es próximo al 3% en relación a la energía consumida en pantógrafos<sup>3</sup> y con posibilidades de alcanzar el 6%.

Este dispositivo permite, además, conocer con detalle y para cada coche el consumo de sus equipos auxiliares, así como la energía consumida por los motores de tracción y la energía de freno enviada a la red o consumida en las resistencias, lo que es de extraordinario interés para establecer balances globales de energía o para analizar el comportamiento de cada elemento del sistema de tracción (**figura 4**). Sobre este tema, todavía es pronto para llegar a conclusiones; no obstante, se observa que los consumos específicos medios mensuales de las distintas unidades muestran una elevada dispersión y que ésta diferencia permanece cuando se comparan los valores mensuales de unidades con valores extremos (**figura 5**), aunque por el momento, no podemos confirmar si esta dispersión es la natural del equipo de tracción o se debe al diferente estado de algún componente determinado<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Contabilizada en contadores de las subestaciones, este ahorro representa un 1,5% de la energía total consumida en la línea para la tracción con sólo el 24% del parque.

<sup>4</sup> En cuanto al balance energético, los primeros cálculos permiten asegurar que en la línea Barcelona – Vallès el envío de energía a la red (catenaria) es aprovechado para la tracción de la cuarta parte del parque de material en servicio, lo que supone una elevada eficiencia del sistema.



Fig. 4: Monitorización de los consumos de las unidades de tren

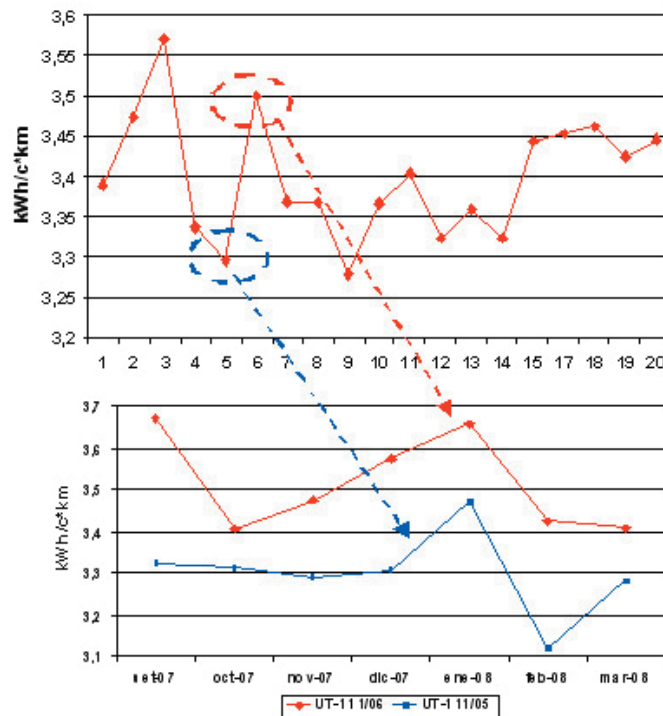


Fig. 5: Diferencias de consumo de energía de tracción en diferentes unidades

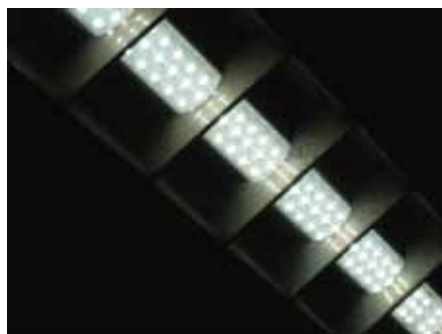
### 3. Actuaciones en las estaciones y dependencias

Las acciones realizadas hasta la fecha en las estaciones y dependencias han consistido principalmente en instalar equipos de corrección del factor de potencia (energía reactiva), difusores de alto rendimiento, cebadores electrónicos en fluorescentes e iluminación de bajo consumo en exteriores, así como generalizar dispositivos de encendido y apagado accionables a distancia y automáticamente. También, se ha favorecido la instalación de ascensores electromecánicos frente a los ascensores hidráulicos por su menor consumo, así como la renovación de las antiguas escaleras mecánicas de accionamiento continuado por nuevas escaleras con arranque automático a dos velocidades, más eficientes.

En 2007 se realizó la primera instalación de un sistema estabilizador–reductor de tensión en el sistema de alumbrado con lámparas de vapor de sodio de nuestro taller general de Rubí. Los resultados han confirmado la reducción del 36% de su consumo, por lo que en 2009 se han instalado estos mismos dispositivos en otras dependencias cuyo consumo global es de 1,26 millones de kWh /año, lo que supondrá un ahorro anual próximo al medio millón de kWh..

Sin embargo, la diversidad y el número de equipamientos e instalaciones en las estaciones es tan grande que se hace necesario conocer cual es su impacto en el consumo global de cada estación y concretar las medidas que faciliten su reducción, sin olvidar la rentabilidad de las mismas. Por ello, se firmó un convenio de colaboración con el ICAEN para el estudio de la mejora energética de las estaciones con el objetivo de establecer los criterios y los materiales que deberán instalarse en las estaciones para tener consumo de energía eficiente. Este estudio, ya finalizado, servirá tanto para el diseño de las nuevas estaciones como para la adecuación de las estaciones existentes.

Una de las iniciativas recogidas en este estudio ha sido la posibilidad de sustituir los fluorescentes convencionales por un conjunto de leds de alta luminiscencia instalados en un tubo de idéntico tamaño, lo que facilita su sustitución (**figura 6**). Tales dispositivos llevan funcionando en el vestíbulo de una estación durante un año con resultado totalmente satisfactorio. Lo que se convertirá en el punto de partida para la renovación sistemática de los fluorescentes tradicionales que iluminan nuestras estaciones especialmente en aquellas áreas donde los valores de eficiencia energética (VEE) sean más desfavorables<sup>5</sup>.



**Fig. 6: Tubo de leds de alta luminiscencia que sustituye al fluorescente tradicional**

Asimismo y como complemento a todo lo anterior, FGC realizó en 2008 una auditoría energética del taller general de Rubí con resultado totalmente favorable. En base a esta experiencia están en curso nuevas auditorías energéticas para todas las estaciones y dependencias cuyo consumo es superior a los 200.000 kWh/año, de acuerdo con lo exigido por el Govern de la Generalitat de Catalunya en su Programa de Ahorro y Eficiencia Energética de julio de 2007.

No obstante, la máxima eficiencia sólo se conseguirá si el número de equipamientos e instalaciones de la estación es el estrictamente necesario para el volumen de viajeros que accederán a la misma; por ello, paralelamente, se ha iniciado un debate interno para determinar que tipología de estación es la estrictamente imprescindible para dar el servicio necesario a un volumen previsto de viajeros, ya que, por ejemplo, la decisión de construir uno o más andenes y uno o más accesos con sus correspondientes vestíbulos, influirá en el número de equipamientos e instalaciones y en definitiva, en el consumo de energía de la estación una vez en servicio.

---

<sup>5</sup> La sustitución de fluorescentes por tubos de leds ha permitido reducir el VEE de 10,1 a 5,1, valor éste inferior al máximo permitido por el Código Técnico de Edificación.

Mención especial merece nuestro edificio corporativo que, en el aspecto energético, ha tenido el asesoramiento del ICAEN. Su configuración arquitectónica y la calidad de los materiales constructivos utilizados juntamente con el sistema de gestión y control (automático y totalmente parametrizable) han permitido reducir la demanda de iluminación y de climatización haciéndolo más eficiente energéticamente.

#### 4. Responsabilidad Social Corporativa

En la medida que un mayor consumo de energía incide en el cambio climático y en el coste del servicio ferroviario, las empresas que, como FGC, deben una parte de sus presupuestos a las aportaciones de la Administración tienen la responsabilidad social de impulsar las acciones de mejora necesarias y es por ello que FGC está orientando su actuación hacia los principios de Responsabilidad Social Empresarial y así, el Plan de Acción en Responsabilidad Social Empresarial elaborado por FGC, en su línea estratégica de acción ambiental, recoge las medidas de ahorro y de eficiencia anteriormente mencionadas, pero además, impulsa la implantación de sistemas que, como el de generación fotovoltaica, están basados en energías renovables más limpias, las cuales ayudarán a paliar (aunque sea modestamente) las necesidades de combustibles fósiles, más contaminantes.

Es por ello, que FGC ha sido pionera al instalar en 2006 un primer equipo en sus dependencias de Rubí con una capacidad de 30 kW, que funciona a pleno rendimiento (**figura 7**) y además, tiene en estudio la implementación de cuatro instalaciones más con una potencia adicional total de 840 kW.



**Fig. 7: Instalación fotovoltaica en el techo de las oficinas de los talleres de Rubí de FGC**

Pero, sin duda, lo más importante ha sido el plan de formación que se ha realizado a todo el personal de FGC entre los años 2008 y 2009, junto con campañas de sensibilización personalizadas en materia de consumo de energía, agua y papel, una muestra de las cuales se ha recogido en la **figura 8** juntamente a las que realiza el ICAEN con carácter más general.



**Fig. 8: Folletos de la campaña de sensibilización**



## EL CALOR HACE MÁS VELOCES LOS TRENES

Alberto García Álvarez, Fundación de los Ferrocarriles Españoles

**Resumen:** Las condiciones atmosféricas y, entre ellas, las elevadas temperaturas, influyen en el comportamiento de la marcha de un tren y repercuten directamente en aspectos claves como su velocidad y el consumo energético. Así, a mayor temperatura, se produce un sensible incremento en la velocidad de los trenes, mientras que su consumo disminuye.

**Palabras clave:** Velocidad, consumo energético, temperatura.

**Abstract:** Atmospheric conditions, including rising temperatures, influence the behavior of the movement of a train and impact directly on relevant aspects such as speed and energy consumption. Thus, the higher the temperature, there is a marked increase in the speed of trains, while consumption decreases.

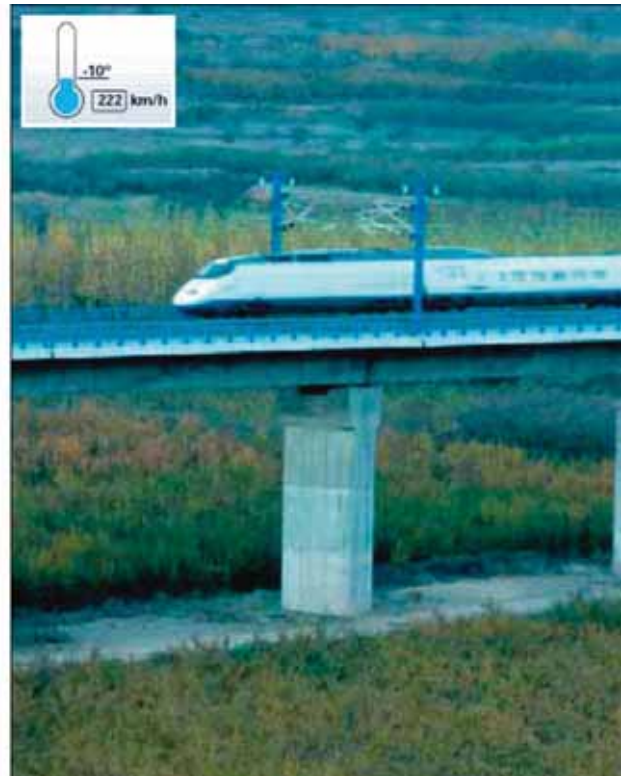
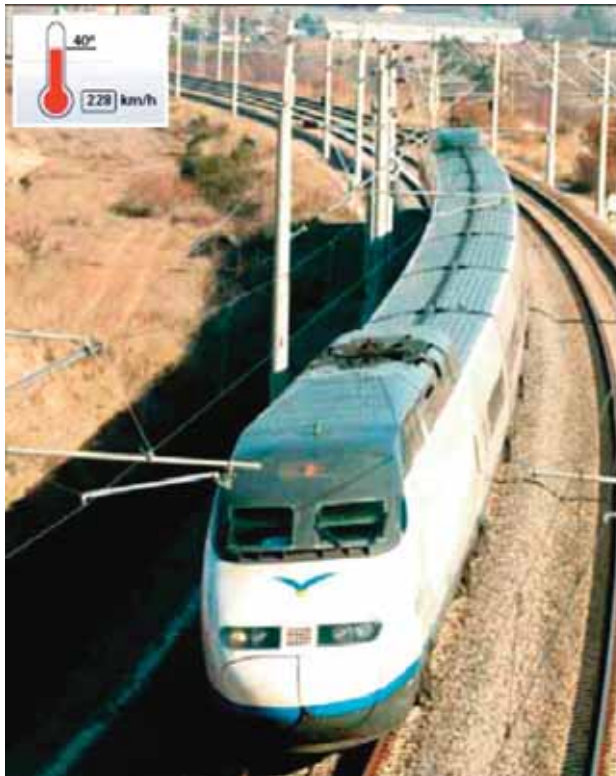
**Keywords:** Speed, energy consumption, temperature.

### 1. El calor hace más veloces los trenes

Las condiciones atmosféricas influyen de manera determinante en el comportamiento de la marcha de un tren y, entre ellas, las elevadas temperaturas. Un tren AVE de la serie 100, por ejemplo, puede subir una rampa de 25 milésimas a una velocidad sostenida de 222 km/h, si la temperatura exterior es de 10 grados centígrados. Pero si la temperatura sube hasta 40 grados, la velocidad que puede mantener el tren aumenta hasta los 228 km/h.

También con el calor desciende el consumo energético del tren. Si el Talgo 350, serie 102 de Renfe, circula sobre un perfil horizontal a una velocidad constante de 330 km/h (su velocidad máxima) el consumo de energía es de 20,5 kwh/km a una temperatura ambiental de -10 grados, pero se observa que el consumo baja un 14,6 por ciento si la temperatura sube hasta 40°C.

¿Por qué los trenes eléctricos con la misma potencia alcanzan mayores velocidades o disminuyen su consumo a la misma velocidad cuando hace más calor en el exterior? ¿Y estos comportamientos son achacables sólo a los trenes de alta velocidad? ¿Cómo se concilia este hecho con el hecho de que los motores diesel tienen menos rendimiento cuando hace calor?



## 2. Aerodinámica

Para dar la respuesta a estas preguntas, conviene recordar que el tren tiene que vencer las fuerzas que oponen a su movimiento: la resistencia mecánica (más o menos proporcional a la masa) que es debida a todos los rozamientos que se producen en el movimiento; la resistencia aerodinámica que se opone al avance (proporcional al cuadrado de la velocidad) y que es debida tanto al choque del tren con el aire (resistencia de presión) como al roce del tren con el aire (resistencia de fricción). Además, la inercia se opone al aumento de la velocidad, y la fuerza gravitatoria a que el tren gane cota en altura.

Mientras los trenes circulaban a velocidades convencionales (máximas del orden 100 a 120 km/h), con muchas paradas y cambios de velocidad, la resistencia aerodinámica no pasaba del 30-40 por ciento del total, pero en alta velocidad puede llegar al 90-95 por ciento.

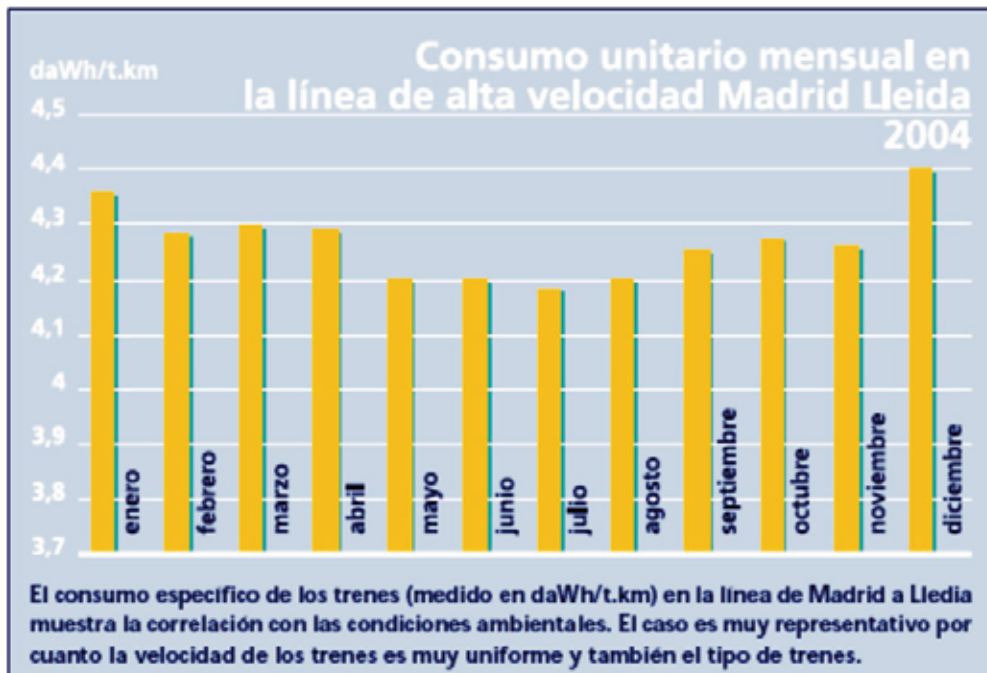
¿Y qué tiene esto que ver con el calor? Pues que esta resistencia aerodinámica es mayor cuando el aire es más denso, es decir, cuando pesa más.

Sucede algo parecido a lo que ocurre si tenemos que mover un cuerpo dentro de un fluido. Si el fluido es aceite cuesta más moverlo que si fuera agua, ya que el “choque” y el “roce” son mayores, pues el aceite es más denso.

Así la densidad del aire y, por ello la resistencia aerodinámica al avance, de los trenes aumenta al disminuir la temperatura y al aumentar la presión atmosférica.

En muchos puntos de la Meseta que ocupa una parte importante del territorio español, se pueden registrar a lo largo del año variaciones de temperatura de cerca de 50 grados (por ejemplo de  $-10$  grados a  $40$  grados) lo que supone, a igualdad de presión, un aumento de la densidad del aire del 17,55 por ciento, y por ello del 20 por ciento en la resistencia al avance.

Este efecto pudo comprobarse en la línea de alta velocidad Madrid-Lleida, en la que los trenes circulan todos a la misma velocidad y el número de trenes es muy uniforme. El consumo global de energía en la línea sube en los meses de invierno y baja en los de verano. Los mayores consumos en esta línea se han registrado en las últimas semanas de diciembre de 2004 y de enero de 2005, especialmente frías.



### 3. Aeronáutica

El que con una mayor temperatura (y presión atmosférica) la fuerza que se opone al avance es menor, es algo bien conocido en el ámbito de la aviación. De hecho se calcula la masa máxima que pueden llevar los aviones en el despegue teniendo en cuenta la temperatura y la presión exterior, ya que en los días de mucho calor, al ser menor la densidad del aire, pueden despegar una masa menor porque las aeronaves tienen menos sustentación.

En relación con el efecto de la presión atmosférica puede apuntarse que la densidad del aire, y por ello la resistencia aerodinámica, también disminuye con la presión y con la altura. Puede estimarse, para una misma temperatura, una disminución de un 2 por ciento por cada 300 metros de incremento de altura. Por ello, la disminución de la resistencia aerodinámica al avance de un tren de alta velocidad entre, por ejemplo, Barcelona (situada al nivel del mar) y Medinaceli (a unos 1.200 metros de altitud) es del orden de un 8 por ciento.

### 4. Trenes diesel

El efecto del calor sobre el movimiento de los trenes se ha estudiado muy poco y es muy poco conocido. Además está en contradicción con otro efecto mucho más conocido aplicable a los motores diesel (tanto de coches como de trenes) y es que el rendimiento de estos motores mejora al densificarse el aire, es decir, se incrementa al aumentar la presión o bajar la temperatura.

Artículo de Alberto García Álvarez publicado en Vía Libre en febrero de 2005. Mas información puede encontrarse en el documento "Dinámica de los trenes de alta velocidad", consultable en la biblioteca de la FFE.





# VALIDACIÓN DE MODELOS DE VENTILACIÓN EN METROS Y TÚNELES FERROVIARIOS

Ana Belén Amado García  
ZITRON

**Resumen:** La precisión en los cálculos teóricos para obras subterráneas se vuelve más y más importante para el diseño eficaz de los sistemas de emergencia como es el caso de la ventilación. Es por eso que cuando algunos circuitos de ventilación requieren un análisis especial se utiliza una de las tecnologías actuales más avanzadas, la simulación tridimensional basada en la Mecánica de Fluidos Computacional, cuya denominación más extendida es CFD.

La estación de metro Uskudar West en Estambul (Turquía) y el túnel ferroviario del aeropuerto de Málaga (España) son dos de los muchos casos que ZITRON ha diseñado, evaluado y validado por medio de este tipo de herramienta.

**Palabras clave:** Seguridad, incendios, túneles, prevención, ventilación.

**Abstract:** The accuracy in the theoretical calculations for underground works turns more and more important for the effective design of emergency systems, like ventilation. That is why when some ventilation circuits need a special analysis one of the most advanced current technologies is used- the three dimensional simulation based on the Computational Mechanics of Fluids. Its more widespread name is CFD.

The Uskudar metro station in Istanbul, Turkey, and the railway tunnel in Málaga airport, Spain, are two of the many cases that ZITRON has designed, evaluated and validated by means of this type of tool.

**Keywords:** Safety, fires, tunnels, prevention, ventilation.

## 1. ZITRON

Situada en Gijón (Asturias) y con presencia en los cinco continentes, ZITRON ha logrado situarse como una de las primeras compañías europeas de diseño de equipos de ventilación para minería subterránea y obras públicas.



Una experiencia de más de cuarenta años y un alto nivel de competencia tecnológica unido a un profundo conocimiento del sector en el que actuamos, es la base sobre la que hemos construido nuestro negocio.

ZITRON ha desarrollado importantes proyectos de sistemas de ventilación para túneles, carreteros y ferroviarios, metros, minas y centrales hidroeléctricas en todo el mundo.

## 2. CFD (Computational Fluid Dynamics)

Estas siglas provienen de la lengua inglesa y su significado es “Computational Fluid Dynamics”. Se trata de una rama de la Mecánica de Fluidos que mediante métodos numéricos y algoritmos analiza y soluciona problemas en los que están involucrados fluidos.

La mecánica de fluidos computacional como se conoce hoy en día nació en la década de los 60, aunque sus primeros éxitos empezaron a publicarse en los 70. La industria de servicios asociada a esta ciencia apareció a principios de los 80 alcanzando su máxima expansión en los 90 gracias al avance de la industria de los ordenadores.

Los paquetes de CFD existentes en el mercado son lo suficientemente potentes y relativamente fáciles de utilizar como para que resulte rentable su utilización a nivel industrial.

ZITRON utiliza este software en todos aquellos circuitos de ventilación en los que las soluciones teóricas son impredecibles, o bien cuando las condiciones son difíciles de simular experimentalmente o en situaciones peligrosas (incendios).

Con este tipo de software se puede simular el modelo o sistema de ventilación que se pretende estudiar y aplicando las ecuaciones de la Dinámica de Fluidos a este prototipo virtual se obtiene una predicción del comportamiento del fluido y sus fenómenos físicos.

Hay tres razones de peso para el empleo de este tipo de programas:

**Visualización:** En el caso de que se trate de un sistema de ventilación de difícil acceso, la simulación permite evaluar el comportamiento del fluido dentro del diseño. El CFD permite obtener una visión mas profunda de los modelos simulados.

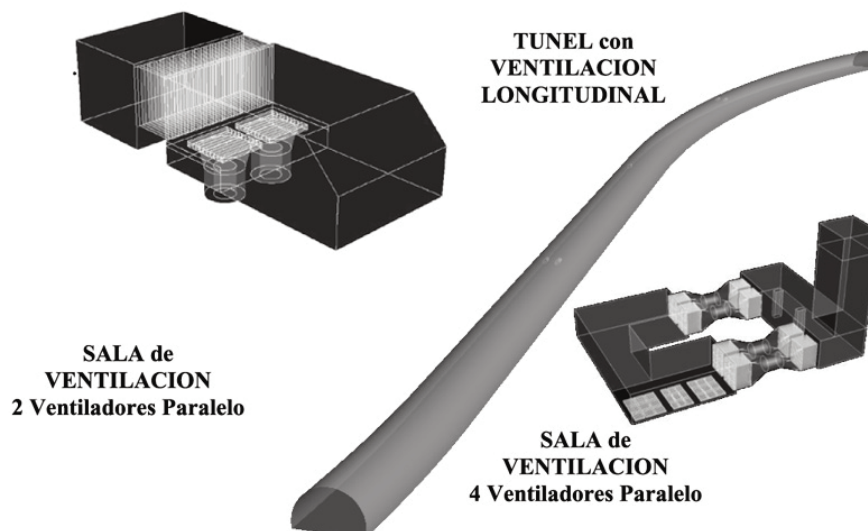
**Previsión:** El CFD es una herramienta para predecir que va a pasar bajo un determinado conjunto de circunstancias. En relativamente poco tiempo, se pueden realizar muchas variaciones de estas circunstancias hasta llegar a un resultado óptimo.

**Eficiencia:** La previsión que se gana con el CFD ayuda a diseñar mejor y más rápido, ahorrar dinero y garantizar el cumplimiento de determinadas condiciones. El análisis por medio de CFD permite ciclos de diseño más cortos y mayor rapidez a la hora de realizar estudios de ventilación que puedan tener muchas variantes.

Hay tres etapas esenciales para cada proceso de simulación por CFD, estas son las siguientes:

**Preproceso:** Es el primer paso de la construcción y análisis de un modelo numérico, a su vez se subdivide en los siguientes pasos:

**1. Diseño:** se logra con una herramienta de dibujo integrada en el software CFD. Básicamente, se trata de definir a través de un grupo de superficies los confines del espacio, es decir, todos los elementos de la arquitectura del sistema según se muestra en Figura 1. Cuanto más se aumente el ámbito y la complejidad de esta representación, mayor es el coste de la modelización CFD, tanto en un mayor esfuerzo durante el establecimiento del problema en el entorno del ordenador, como en la cantidad de recurso de ordenador (potencia y tiempo de procesador) necesario para producir una respuesta



**Figura 1.** Diferentes diseños para distintos sistemas de ventilación

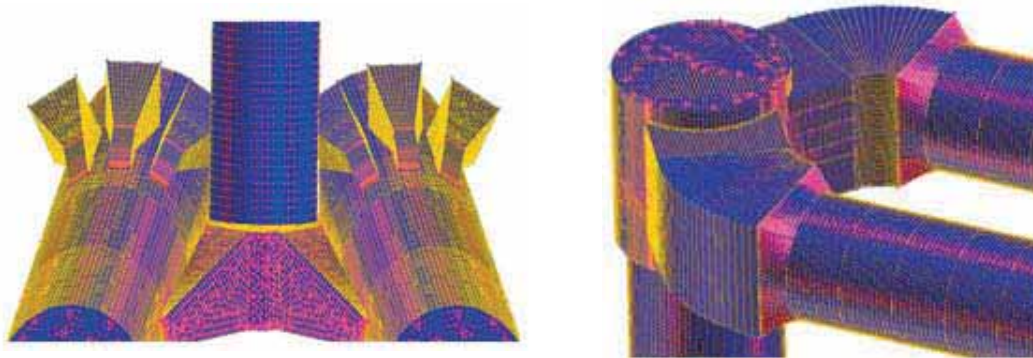
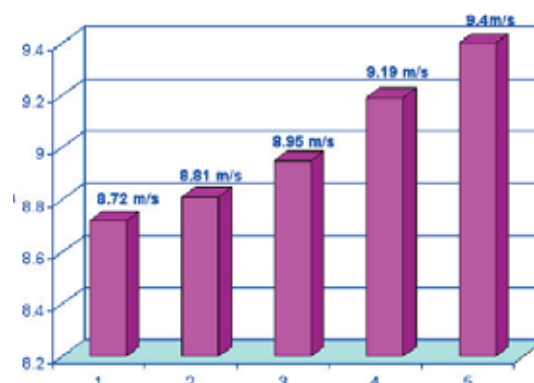
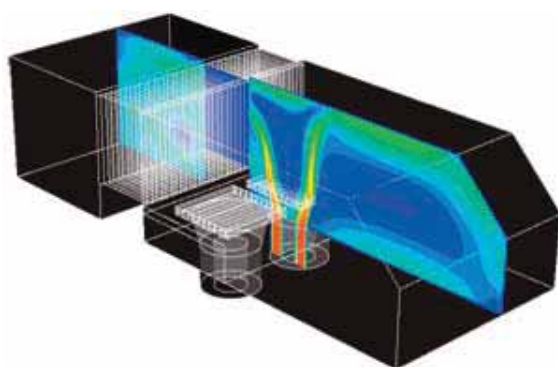
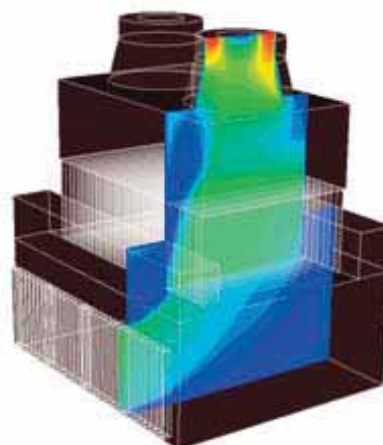
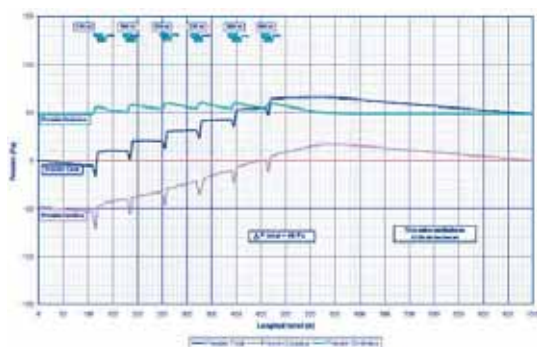
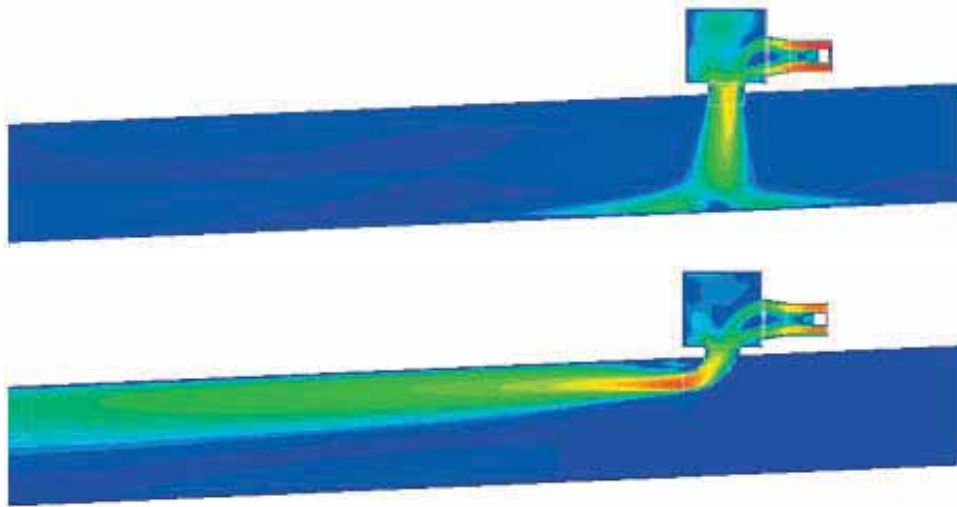


Figura 2. Diferentes mallados para distintos sistemas de ventilación

2. **Mallado:** el volumen del dominio computacional se divide en pequeños dominios llamados celdas del mallado como se observa en la Figura 2 donde se resolverán las ecuaciones diferenciales. El mallado tiene que representar la forma geométrica del recinto y construirse para permitir la resolución adecuada de los rasgos principales del flujo. El proceso de creación de un mallado puede exigir realizar diversos intentos hasta llegar a crear un mallado aceptable.

3. **Condiciones de contorno:** se imponen los valores de ciertas variables en los límites del dominio: paredes, entradas, salidas...etc. De igual forma hay que imponer condiciones para las variables de turbulencia existentes, según el modelo que se este utilizando. Así mismo se debe incluir cualquier mecanismo que influya en la conducta del flujo aunque sea externo (puertas, ventanas, huecos...etc.)





**Figura 3.** Imágenes y gráficos obtenidos del postproceso para distintos sistemas de ventilación

**Resolución:** Consiste en la transformación de un grupo de ecuaciones diferenciales continuas que describen la física del problema en un sistema de ecuaciones aproximadas para el cual se puede obtener una solución mediante algoritmos iterativos.

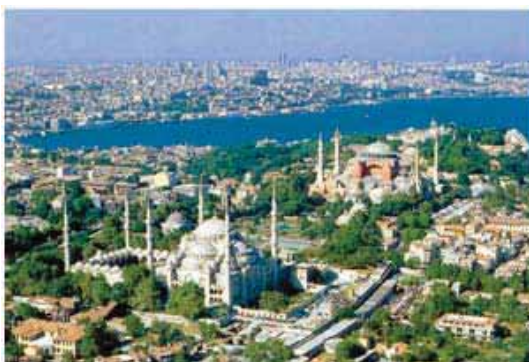
**Postproceso:** Para el análisis de la gran cantidad de resultados obtenidos es necesario el uso de un post-procesador. Se trata de un software capaz de leer el fichero que contenga los resultados de una simulación y convertirlos en imágenes, gráficos y animaciones, como se muestra en la Figura 3.

### 3. Aplicaciones CFD en metros y túneles ferroviarios

En toda simulación CFD de fenómenos físicos y químicos, la validación de los resultados es un aspecto clave para determinar la validez de la misma. Para poder realizar dicha validación es necesario disponer de medidas experimentales obtenidas en el lugar objeto de la simulación. A continuación vamos a exponer dos casos reales en los que se ha utilizado esta herramienta y su posterior validación.

#### **CASO 1 - ESTACION de METRO USKUDAR**

Esta estación de metro se encuentra en Estambul (Turquía). En este caso se trataba de evaluar a través de CFD las pérdidas generadas por el circuito para poder diseñar de forma correcta los ventiladores necesarios en la estación.



El circuito de ventilación esta compuesto de cuatro ventiladores en paralelo, además de múltiples accesorios como dampers, difusores, silenciadores de baffles, también bifurcaciones y varios codos según se observa en la Figura 4 .Debido a esta complejidad y a que generalmente los cálculos teóricos no predicen las zonas de recirculaciones se recurrió al uso de CFD para realizar el calculo de las perdidas de carga generadas en el circuito y elegir el perfecto diseño de los ventiladores para esta estación.

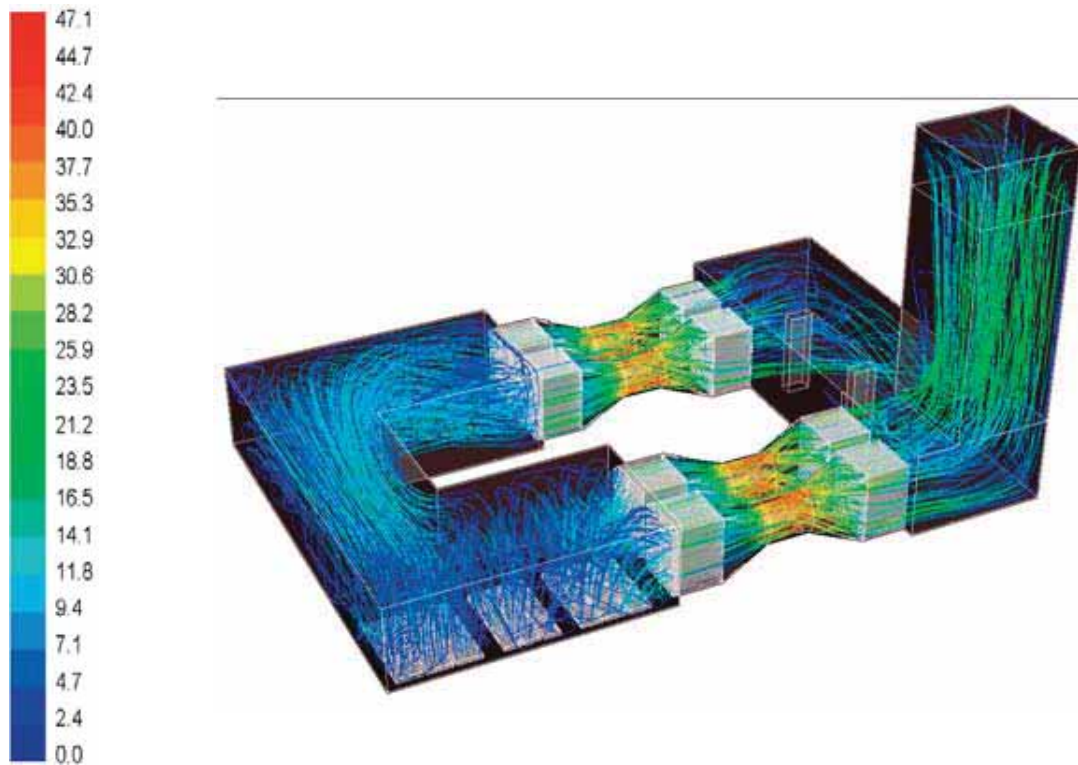


Figura 4. Trayectorias de velocidad en la simulación para la estación Uskudar

Posteriormente se realizo la puesta en marcha y medición de los caudales circulantes y presiones generadas por el circuito verificando la validación de los resultados alcanzados en la simulación.



## CASO 2 - TUNEL LA LINEA GUADALHORCE-AEROPUERTO

Este túnel se encuentra localizado en Málaga comunicando la estación bajo el Aeropuerto con la estación de Guadalhorce. Se trata de un túnel de 2900 m en curvatura y en el que se pueden distinguir varias zonas, como se muestra en la Figura 5.

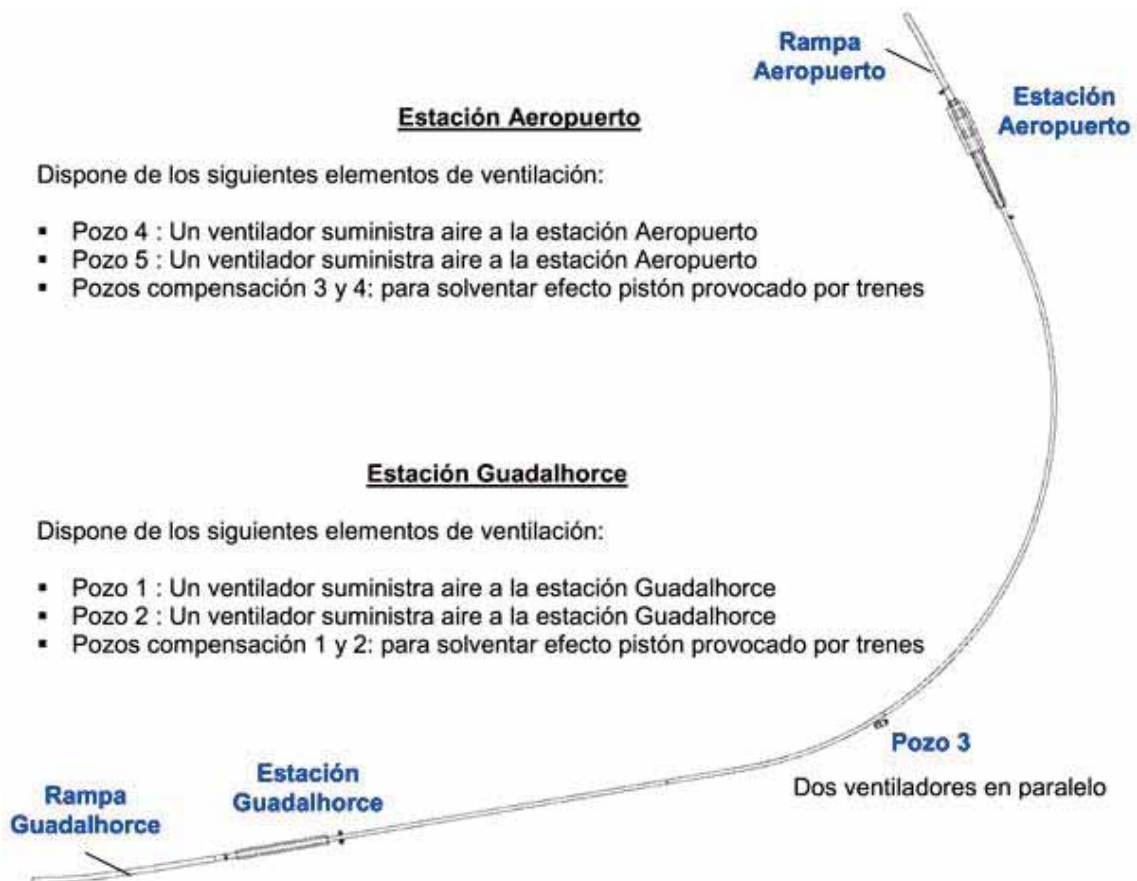


Figura 5. Vista en planta del túnel completo

En los cálculos de ventilación realizados para este túnel se barajaron varios escenarios de incendio

**Escenario 1** - Incendio en túnel entre estación Guadalhorce y Pozo 3

**Escenario 2** - Incendio en túnel entre Pozo 3 y Estación Aeropuerto

**Escenario 3** - Incendio en Rampa Guadalhorce

**Escenario 4** - Incendio en Rampa Aeropuerto

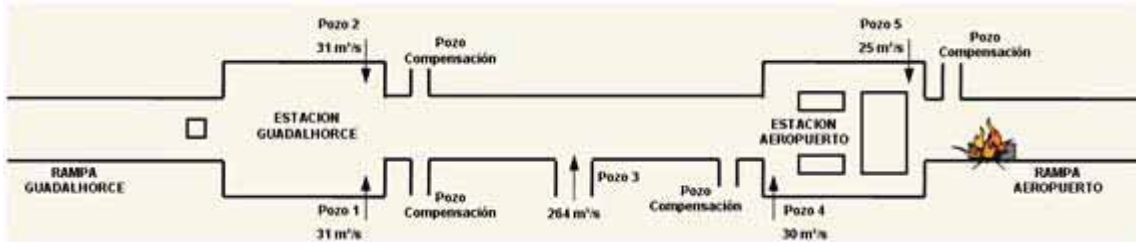
El objetivo al utilizar la herramienta CFD era verificar que los cálculos teóricos realizados y la ventilación diseñada eran los adecuados para este túnel, asegurando la velocidad crítica en la zona de incendio.

La velocidad crítica es la mínima velocidad longitudinal necesaria para evitar que los humos se vayan aguas arriba del incendio (lado de ventilación), esta se calcula a través de una fórmula matemática que depende de las características del túnel (sección, pendiente, altura túnel, potencia incendio...etc.). Se muestra la expresión más utilizada para el cálculo de la velocidad crítica.

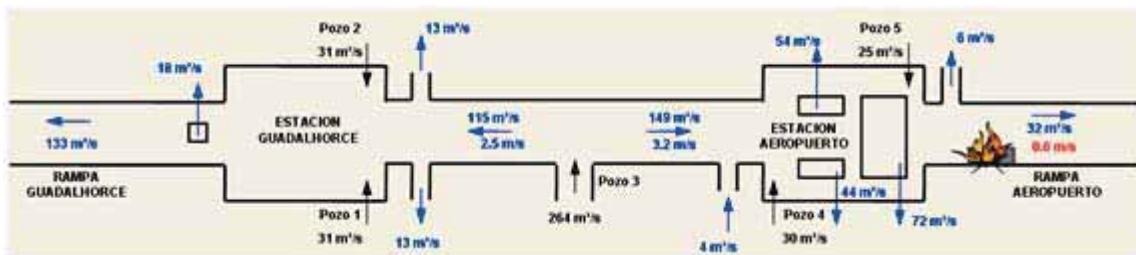
$$v_c = K_1 K_2 \left[ \frac{gHQ}{\rho_\infty C_p A \left( \frac{Q}{\rho_\infty C_p A v_c} + T_\infty \right)} \right]^{1/3}$$

En caso de que el incendio se localizase en el túnel se debería conseguir una velocidad crítica de 2.6 m/s en el túnel, mientras que para el caso de que el incendio se localice en una rampa se debería tener en esa rampa una velocidad de 2.3 m/s

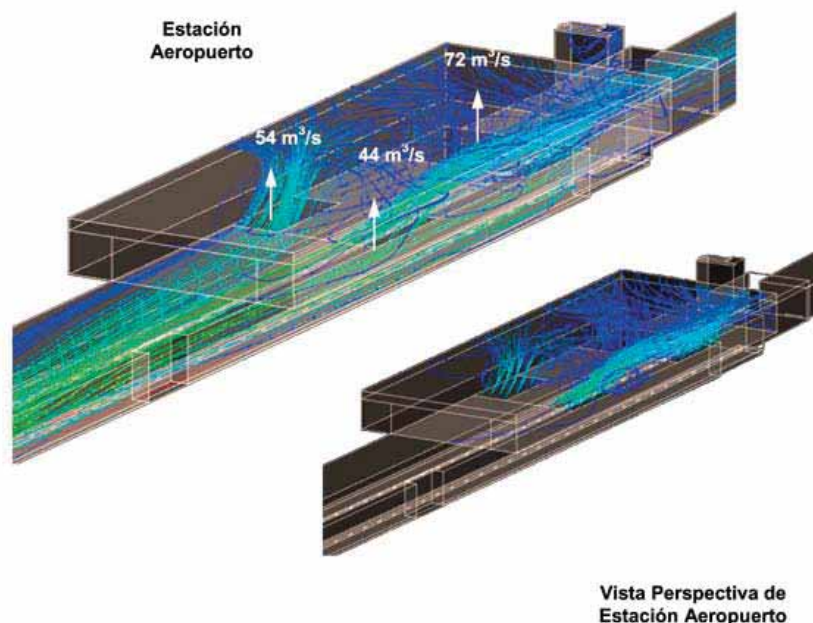
Tras realizar las simulaciones del túnel completo correspondiente a los diferentes escenarios, el único problema lo planteo el Escenario 4 que no cumplía con la velocidad crítica en rampa con las condiciones establecidas en el diseño inicial.



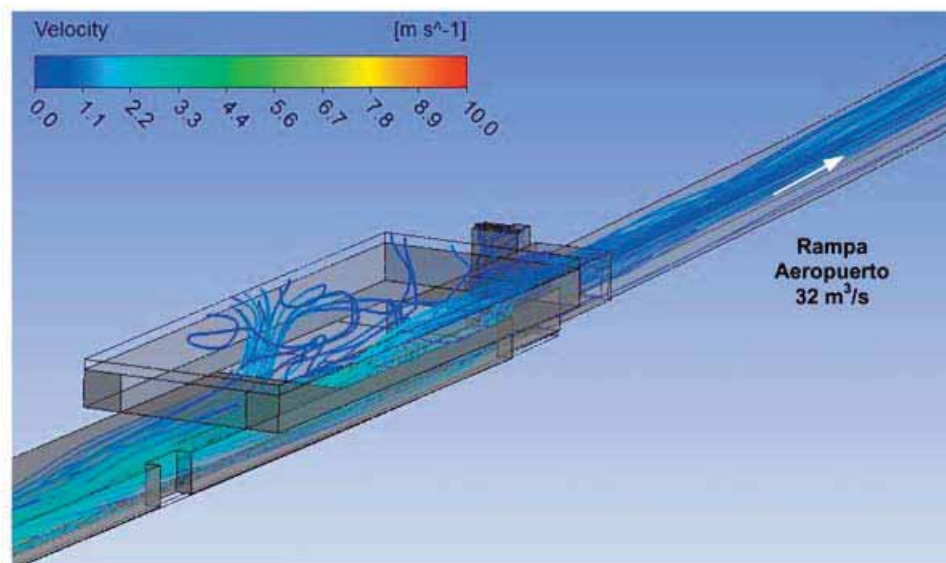
La Figura 6 muestra el reparto de caudales tras la simulación, pudiendo observarse como la velocidad crítica en la zona de la rampa de Aeropuerto no se cumple.



**Figura 6.** Esquema de resultados de simulación Escenario Incendio en Rampa Aeropuerto



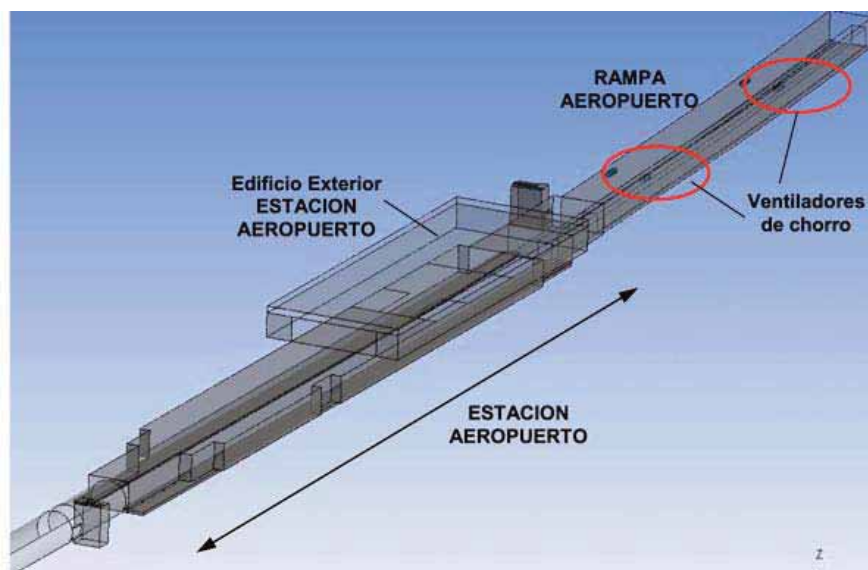
**Figura 7.** Trayectorias de flujo de salida por los huecos de la estación



**Figura 8.** Trayectorias de flujo en Edificio Estación y Rampa Aeropuerto

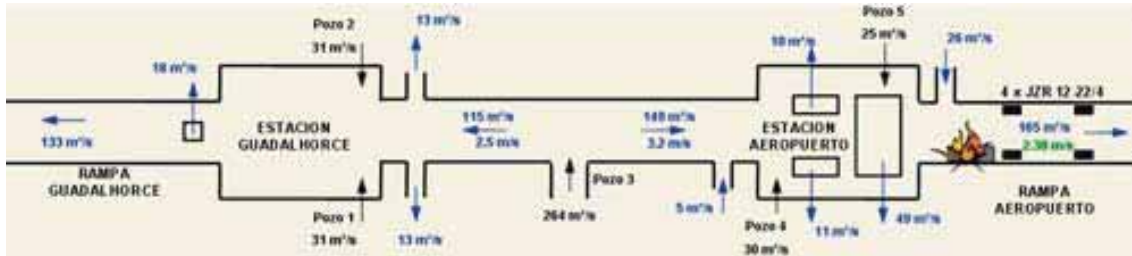
Esto era debido a que pese a todo el caudal suministrado por los ventiladores del Pozo 3 y los ventiladores de las estaciones no se conseguía hacer circular el aire necesario por la rampa ya que la mayor parte de este se desviaba hacia la zona superior de la Estación Aeropuerto como se muestra con las trayectorias de flujo de la simulación.

Para solventar este problema se recurrió al uso de ventiladores de chorro, colocados en las rampas según se observa en la Figura 9. Estos debido a su disposición logran mover el aire necesario por la rampa Aeropuerto y evitan que se fugue parte del caudal que antes se filtraba por los huecos de la estación, desplazando este a la rampa y aumentando la velocidad conseguida en esa zona.



**Figura 9.** Localización de ventiladores de chorro en Rampa Aeropuerto

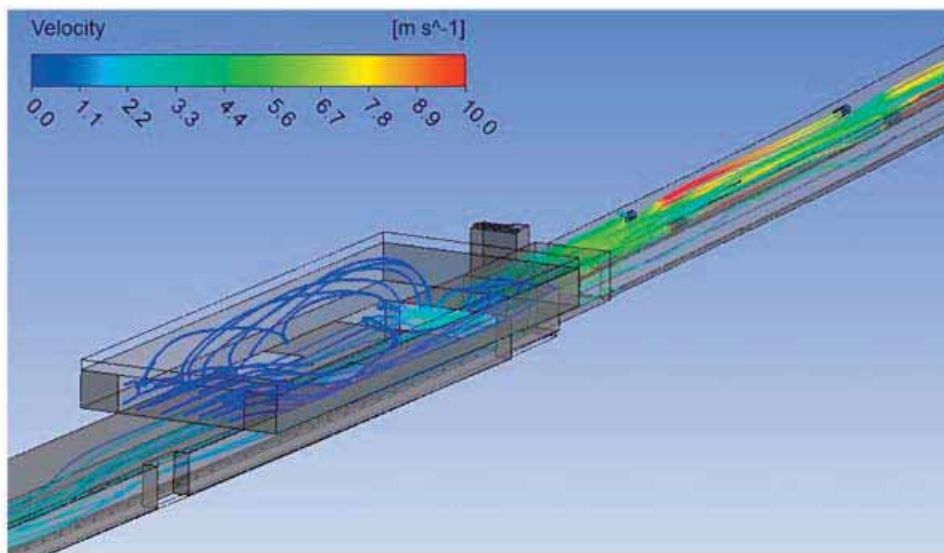
El esquema siguiente Figura 10 muestra el reparto de caudales tras la simulación, pudiendo observarse como la velocidad crítica en la zona de la rampa de Aeropuerto si se cumple con la ayuda de los ventiladores de chorro.



**Figura 10.** Esquema de resultados de simulación con ventiladores de chorro en Rampa Aeropuerto

El funcionamiento de los ventiladores de chorro se basa en el principio de la trasmisión de la cantidad de movimiento, donde una parte de la totalidad del aire que circula por la sección del túnel es aspirada por los ventiladores de chorro e impulsada a continuación con una energía cinética elevada. Esta porción comunica un impulso al resto del aire, que se desplaza también en dirección longitudinal hacia la boca de salida del túnel.

En la Figura 11 se muestra el aumento de velocidad en la rampa de Aeropuerto cuando los ventiladores de chorro están operativos.



**Figura 11.** La velocidad se incrementa en la Rampa Aeropuerto con el uso de ventiladores de chorro.

#### 4. Conclusiones

En este informe se aprecia la importancia del cálculo con programas CFD así como su validación posterior in situ, ya que resultan muy útiles para la buena definición de los sistemas de ventilación.

En el caso de la Estación de Metro de Estambul para el mejor dimensionamiento de los ventiladores del sistema y en el caso del Túnel entre la Estación Guadalhorce y la Estación Aeropuerto de Málaga para evitar que un diseño de ventilación insuficiente en un escenario de incendio provoque un fallo posterior en el sistema.



## PROYECTO RAILCEN: ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE UN INCENDIO EN VEHÍCULO FERROVIARIO PROVOCADO POR MATERIALES DE INTERIORISMO DE ACUERDO A CEN / TS 45545-2.D.

**Project RAILCEN: Study of the evolution of fire in railway vehicle due by  
internal materials of agreement to CEN / TS 45545-2.**

Marta López (marta.lopez@cidemco.es)  
Izaskun Martínez (izaskun.martinez@cidemco.es)

CIDEMCO-Tecnalia  
Área Anardi, N° 5, Apartado 134  
Azpeitia (Guipúzcoa)

Anna Lacasta (anna@fa.upc.edu), Universidad Politécnica de Cataluña  
Pasi Nylander (pnylander@talgo.com), Patentes TALGO S.L.  
Emiliano Gallego (egallego@fainsa.com), FAINSA S.A.a)

**Resumen:** La reciente aprobación de la especificación técnica CEN/TS 45545, es considerada un gran avance en lo que a requisitos de seguridad en ferrocarriles se refiere, debido a la importante necesidad actual de unificación de exigencias frente a incendio originado por la cada vez mayor red de tráfico ferroviario entre diferentes países de la UE. Así, a nivel nacional, dos empresas de importante participación en el sector como son FAINSA S.A. (fabricante de asientos) y Patentes TALGO S.L. (fabricante de vehículos ferroviarios), con trayectoria demostrable en I+D, junto al centro tecnológico CIDEMCO-Tecnalia y la Universidad Politécnica de Cataluña en colaboración con la brigada de bomberos de Cataluña, están llevando a cabo el proyecto de I+D financiado por el Ministerio de Fomento Convocatoria 2008 de ayudas a proyectos de I+D+I del Subprograma de Transporte e Infraestructuras, con acrónimo “RAILCEN. Evolución del incendio en vehículo ferroviario provocado por materiales de interiorismo de acuerdo a CEN / TS 45545-2.” con la intención de aumentar el conocimiento acerca del comportamiento de los materiales de interiorismo empleados actualmente en la fabricación de diferentes diseños de vehículos rodantes y de su adecuación a los niveles de riesgo exigidos en la normativa de próxima entrada en vigor. Para ello, se realizará una búsqueda de materiales alternativos más respetuosos ecológicamente así como un estudio del desarrollo del incendio mediante herramientas de simulación de última generación validadas mediante ensayo real y que son empleadas en otros campos de la Ingeniería del fuego.

**Palabras clave:** vehículo ferroviario, materiales de interiorismo, evolución del incendio, nuevas exigencias en seguridad incendio dentro del marco europeo.

**Abstract:** Due to the important change as for concept of fire Security and fire requirements that derive from the approval of the present CEN/TS 45545 to European level, and therefore also national level, two national enterprises of high participation in the sector, FAINSA S.A. (manufacturer of seats)

and TALGO S.L. (manufacturer of railway vehicles), with demonstrable research lines, are employed at the present project by means of the modality of group, two centres of R&TD, the Fire Engineering Area of CIDEMCO-Tecnalia (technological research centre) and the Technical University of Catalonia at collaboration with Fire brigade of Catalonia, to present the project of R&TD “RAILCEN. Evolution of fire in railway vehicle due by internal materials of agreement to CEN / TS 45545-2.”. This project can be divided into two interrelated work steps that take as final aim to obtain a higher degree of knowledge on the basis of the normative European requirements on the current levels of safety of the internal materials used in different designs of railway vehicles. On the other hand, the study of the minimization of its levels of risk by means of the employment of designs and alternative materials, as well as the study of the development of the fire by means of tools of simulation of last generation verified by means of real tests, will be carried out.

**Keywords:** railway vehicle, internal materials, fire evolution, new requirements in fire security in European frame.

## **1. La especificación CEN TS 45545:2006**

El Debido a la necesidad de interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo convencional y de alta velocidad, y a la publicación de la Directiva 96/48/CE y 2001/16/CE, se ha hecho necesaria una armonización de criterios de ensayo y clasificación en todos los países miembros de la UE dentro del Sector ferroviario, al igual que ya se había dado en otros sectores. En este contexto, se ha presentado el documento CEN TS 45545:2006 que se ha preparado bajo mandato de la Comisión Europea para proporcionar medios para el cumplimiento de los requisitos esenciales de Seguridad frente incendios recogido en estas directivas europeas.

Esta especificación ha sido preparada por el Grupo de trabajo CEN TC 256 “Aplicaciones ferroviarias” en cooperación con el Comité Técnico CENELEC TC 9X “Aplicaciones ferroviarias eléctricas y electrónicas”. La aprobación de esta especificación técnica, es considerada un gran avance en lo que a requisitos de seguridad en ferrocarriles se refiere, debido a la importante necesidad actual de unificación de exigencias frente a incendio y a la cada vez mayor red de tráfico ferroviario entre diferentes países de la UE.

La CEN TS 45545:2006 se basa en los reglamentos de seguridad frente incendios ya existentes para vehículos ferroviarios de la Unión Internacional del Ferrocarril (UIC) y de distintos países (Francia, Alemania y Reino Unido) como puntos de referencia para requisitos conceptuales. Utilizando las categorías de diseño y de operación definidas en CEN TS 45545-1:2006, los requisitos establecidos en las diferentes partes de CEN TS 45545:2006 tienen en cuenta las condiciones operativas actuales del transporte público ferroviario en Europa.

Así, la especificación CEN/TS 45545:2006 se puede dividir en las siguientes partes:

- Parte 1: General, incluyendo categorías de vehículos.
- Parte 2: Requisitos del comportamiento frente al fuego de materiales y componentes.
- Parte 3: Requisitos de resistencia al fuego de barreras cortafuegos.
- Parte 4: Requisitos de seguridad frente incendio de diseños de material rodante ferroviario.
- Parte 5: Requisitos de seguridad frente incendio para equipamiento eléctrico.
- Parte 6: Sistemas de control y gestión de incendio.
- Parte 7: Requisitos de seguridad frente incendio para líquidos e instalaciones de gas inflamables.

Entre las innovaciones más importantes de la especificación técnica CEN TS 45545:2006 se encuentra la clasificación de los vehículos ferroviarios en 4 categorías de operación o servicio dependiendo de características de circulación del vehículo (por túneles, estructuras elevadas...), si existen lugares de evacuación...

Asimismo divide los diseños de los vehículos en 4 tipos (N, A, D y S) según su finalidad y plantas de los que conste. De acuerdo con ambas clasificaciones establece unos niveles de riesgo, HL1, HL2 y HL3 que deben cumplir los materiales que forman parte de cada tipo de vehículo ferroviario, según la siguiente tabla:

| Categoría de diseño<br>Categoría de servicio | N: Vehículos estándar | A: Vehículos automáticos sin personal formado para emergencias | D: Vehículo de dos plantas | S: Vehículo con camas o literas, de una o dos plantas |
|--|-----------------------|--|----------------------------|---|
| 1  | HL1                   | HL1  | HL1                        | HL2   |
| 2  | HL2                   | HL2  | HL2                        | HL2   |
| 3  | HL2                   | HL2  | HL2                        | HL3   |
| 4  | HL3                   | HL3  | HL3                        | HL3   |

Es decir, según la anterior tabla, vehículos estándar cuya categoría de servicio sea considerada de clase 4 (máximo riesgo) deberán estar compuestos por materiales y componentes clasificados como HL3 (altas prestaciones frente incendio). Para establecer la clase de riesgo de un material, primeramente es necesario conocer su uso, porque dependiendo de su uso,

los ensayos para caracterizarlo serán diferentes. Por ejemplo, un material que se use para tapizar un asiento será sometido a diferentes ensayos si su colocación es en la superficie inferior ó superior del reposabrazos. La filosofía de los análisis también varía, puesto que hasta ahora los materiales se consideraban de manera independiente. Con la introducción de la CEN/TS 45545-2:2006 deberán considerarse los materiales en su conjunto (por ejemplo: apoyabrazos con carcasa/tejido/espuma) para someterse a los análisis. De esta manera la caracterización será más fiel a la realidad pero provocará que el nivel y dificultad de caracterización frente al fuego de los materiales que componen un vehículo ferroviario aumente de manera significativa respecto a los métodos que se emplean hasta ahora para hacerlo de acuerdo a la Directriz Técnica de RENFE.

Además, el desarrollo de la ciencia y tecnología del incendio en los últimos años, ha originado la aparición de un nuevo enfoque para la caracterización del comportamiento frente al fuego de los materiales, basado en la medición de la velocidad de cesión de calor (heat release rate-HRR). En este sentido, una de las principales novedades de la parte 2 del proyecto de norma es que incorpora este nuevo concepto, principalmente a través de ensayos a escala ISO 5660 (cono calorimétrico (Fig. 1a-b)) para el cálculo de la velocidad de cesión de calor, y del ensayo a escala real (EN ISO 9705-2) para el análisis del comportamiento al fuego de un asiento completo de pasajeros (Fig. 2a-b). Además, para la determinación de la generación y toxicidad de los humos, se ha propuesto el ensayo EN-ISO 5659-2, utilizando la cámara de valoración de densidad óptica de humos con la novedad del análisis de gases mediante FTIR, método que consiste en el análisis de los gases presentes en los efluentes de un fuego de forma discontinua usando un espectroscopía de transformada de Fourier (Fig. 3a-b).

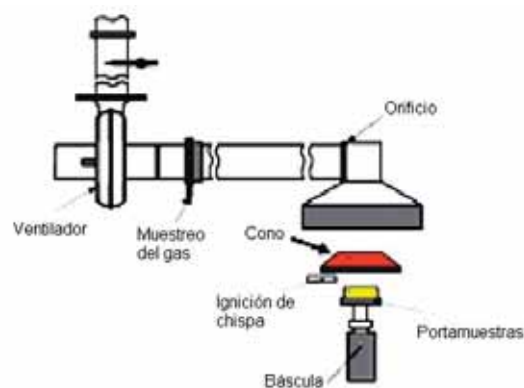


Fig. 1a-b. Cono calorimétrico (ISO 5660).

Sin embargo tal y como ha sido reflejado en diferentes jornadas organizadas a nivel nacional sobre el tema de la aplicación de la especificación, existe un gran desconocimiento e incertidumbre en el sector ferroviario respecto a los cambios que va a suponer la implantación de esta nueva reglamentación, respecto a la necesidad o no de materiales alternativos con prestaciones mejoradas, el incremento de los costes de fabricación que ello derivará, los consiguientes cambios en los diseños de material rodante etc.

## 2. El proyecto RAILCEN

La empresa FAINSA S.A., que ha estado involucrada en la elaboración de dicha especificación y dispone de conocimiento de primera mano sobre la misma (especialmente de sus partes más conflictivas de implantación como es la parte 2 de la CEN TS 45545 relativa a Requisitos de seguridad contra incendios de materiales y componentes), llevó a cabo junto a CIDEMCO-Tecnalia un estudio preliminar en Junio de 2007 para la III Jornada en Seguridad en Ferrocarril, sobre la clasificación en niveles de riesgo de ciertos materiales comúnmente utilizados en asientos cuando son sometidos a los requisitos normativos aplicables en la actual Directriz Técnica de RENFE DT PCI/5 A y en la próxima CEN TS 45545-2. Conclusiones de este estudio hacían referencia a que materiales que son considerados con comportamiento de baja inflamabilidad (clasificación M1) según la directriz RENFE DT PCI/5 A, se clasificarían como HL1 y no sería permitida su instalación en cualquier categoría de servicio de vehículo ferroviario según CEN TS 45545.

Por lo tanto, debido a estas preocupantes conclusiones originadas por el cambio en cuanto a concepto de Seguridad frente incendio que supone dicho documento, FAINSA S.A. y CIDEMCO-Tecnalia deciden formar una agrupación junto con EPSEB-UPC y TALGO S.L. para presentar el proyecto "RAILCEN. Evolución del incendio en vehículo ferroviario provocado por materiales de interiorismo de acuerdo a CEN / TS 45545-2.", con el fin de adelantarse a la incorporación de la especificación CEN TS 45545-2 e ir adecuando sus diseños al requisito de Seguridad frente incendio que próximamente entrará en vigor.

La parte de la norma que da lugar a la primera fase de estudio del presente proyecto es la parte 2, es decir, la que afecta a cualquier material de interiorismo en vehículos ferroviarios, entre los cuales se encuentran de manera importante los asientos, al considerarse éstos de manera aproximada un 70% de la posible carga combustible en un vagón de pasajeros.

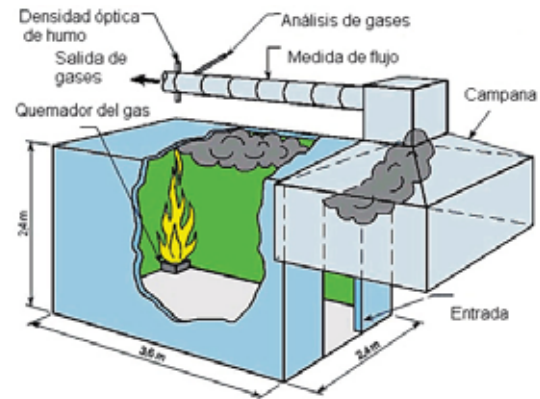


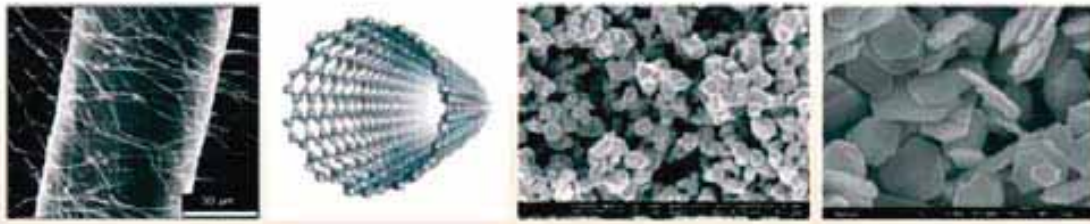
Fig. 2a-b. CEN/TS 45545-2:2006 Anexo B (fuente: SP Technical Research Institute of Sweden).



Fig. 3a-b. Cámara de valoración de densidad óptica de humos con FTIR acoplado (ISO 5659).

El proyecto RAILCEN se puede desglosar en dos fases de trabajo interrelacionadas que tienen como objetivo final el conseguir un mayor grado de conocimiento en base a las exigencias normativas europeas de próxima entrada en vigor sobre los niveles de seguridad frente incendio actuales de los materiales de interiorismo empleados en diferentes diseños de vehículos ferroviarios, la minimización de sus niveles de riesgo mediante el empleo de diseños y materiales alternativos, así como el estudio del desarrollo del incendio mediante herramientas de simulación de última generación validadas mediante ensayo real que son empleadas en otros campos de la Ingeniería del fuego.

En la primera parte de este proyecto, y a la luz de los resultados obtenidos del análisis de los niveles de riesgo de los materiales de interiorismo actuales, puede ser necesaria una implantación de materiales alternativos con propiedades frente al fuego mejoradas cuyo coste económico sea muy superior a los materiales convencionalmente empleados en el sector. Se hará especial hincapié en la inclusión de componentes cuya dispersión sea a nivel nano, tales como nanoarcillas, nanotubos o nanofibras de carbono en conjunción o no, con otros retardantes de llama habituales que parece que es una línea que puede ser interesante para la fabricación de nuevos materiales para la construcción de trenes y más resistentes al incendio exterior.



**Fig. 4. Diferentes clases de Nanoaditivos: Nanofibras, Nanotubos, Nanopartículas de Plata, Kaolinita.**

De hecho, si durante el desarrollo de la tarea 3 del proyecto, relativa al “empleo de materiales alternativos con prestaciones frente al fuego mejoradas”, se concluye que el incremento en el coste de materia prima para la fabricación de los diseños estándar es superior a un 20-30%, FAINSA S.A. plantea abrir una nueva línea de investigación junto con sus fabricantes suministradores de material de asiento (textiles, barreras, carcasas envolventes etc), para intentar minimizar este coste.

Respecto a la simulación computacional, cabe destacar que este tipo de herramientas se utilizan en muchos campos de la investigación básica y en aplicaciones tecnológicas avanzadas. En el caso de la propagación de fuego, el desarrollo del conocimiento sobre los procesos fisicoquímicos involucrados y los modelos matemáticos que los describen, así como disponibilidad de ordenadores con potencia de cálculo cada vez mayor, han posibilitado que los programas de simulación sean cada vez más utilizados. Las simulaciones permiten analizar y visualizar los efectos que un hipotético incendio puede tener en un determinado espacio como por ejemplo un edificio, un túnel o un vagón de tren.

Aunque existen diferentes tipos de simuladores, posiblemente el más utilizado a nivel mundial es el FDS (Fire Dynamics Simulator) desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST). Sus aplicaciones incluyen una amplia variedad de problemas, desde investigación básica hasta análisis siniestral de casos reales, pasando por el diseño de soluciones constructivas, espacios interiores o sistemas de ventilación. Son ya muchos los grupos de investigación que trabajan en el desarrollo y validación de este programa, y es de prever que en un futuro sean todavía más utilizados. Además, como última etapa, se ha propuesto la validación de la modelización mediante un ensayo a escala real del incendio de un vagón.

Este proyecto se considera estratégico no únicamente para FAINSA S.A. y TALGO S.L., sino en general para todo el sector ferroviario tal y como refleja el hecho de que esta línea de investigación sea marcada como prioritaria en la Agenda Estratégica de investigación del Sector Ferroviario elaborada por la Plataforma Nacional del Ferrocarril (PTFE).

## BIBLIOGRAFÍA

Especificación técnica CEN/TS 45545.

Final Report. Fire Standardisation Research in Railways- FIRESTARR Project.

Polymer Nanocomposites: How to Reach Low Flammability? S. Bourbigot, S. Duquesne, C. Jama, *Macromol. Symp.*, 233, 180–190 (2006).

Nanoparticle networks reduce the flammability of polymer nanocomposites, T. Kashiwagi, F. Du, J. F. Douglas, K. I. Winey, R. H. Harris Jr, J. R. Shields, *Nature Materials*, 4 (2005).

Using clay in PA-based intumescent formulations. Fire performance and kinetic parameters. F. Dabrowski, M. Le Bras, R. Delobel, J.W. Gilman, T. Kashiwagi, *Macromolecular Symposium*, 194, 201–206 (2003).

Fire retardant systems in poly(methyl methacrylate): interactions between metal oxide nanoparticles and phosphinates, A. Laachachi, M. Cochez , E. Leroy , M. Ferriol, J.M. Lopez-Cuesta, *Polymer Degradation and Stability*, 92, 61-69 (2007).





FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

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