



- Desregulación del mercado ferroviario de viajeros
- Development and application of energy optimization models in a railway environment: from railway design to ecodriving
- Mantenimiento: el reto actual de las modernas infraestructuras y redes ferroviarias en España
- Dispositivo Detector de Descarrilamiento y Frenado Automático de Trenes: 3DyFAT
- Nuevas prescripciones de estabilización de suelos con cal para rellenos de terraplén en líneas de alta velocidad de ADIF
- Influencia del trazado en la calidad geométrica de vías férreas
- Fault diagnosis in track circuits based on fuzzy models
- Creación de Mapas de Riesgo Ferroviario a partir de mapas de calor de incidencias
- Representación de datos meteorológicos en la operación de ferrocarriles. Detección de caídas de rayos

**número 5  
diciembre de 2012**

Edita:



**Consejo asesor:**

José Luis López Gómez  
Premio TALGO

Sergio Lopez Lara  
Premio TRIA Railway R&D

Andrés López Pita  
Aula y Premio COMSA

Eduard Rodés  
Director Escola Europea de Short Sea Shipping

Eduardo Romo Urroz  
Fundación Caminos de Hierro

Emilio Larrode Pellicer  
Universidad de Zaragoza

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

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

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

José Cañizares Moyano  
Asociación Europea de Ferroviarios

Ricard Riol Jurado  
Asociación para la Promoción del Transporte Público

**Consejo de redacción:**

Pilar Lozano Carbayo (Directora Editorial, FFE)  
Alberto García Álvarez (Renfe Operadora)  
Miguel Jiménez Vega (FFE)  
Antonio Berrios Villalba (ADIF)  
Rodolfo Ramos Melero (CEU)  
J. Mariano Rodríguez Martínez (Secretario, FFE)

**Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria**

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

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

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

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

Existen unas normas de admisión y de formato de los trabajos, accesibles en la página web:  
<http://www.tecnica-vialibre.es/vltecnicna/normaspub.asp>

La revista en formato digital puede ser descargada gratuitamente en:  
<http://www.tecnica-vialibre.es/vltecnicna/>

**Edita:**

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



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

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

VÍA LIBRE TÉCNICA  
INVESTIGACIÓN FERROVIARIA

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

## SUMARIO

<b>Desregulación del mercado ferroviario de viajeros .....</b>	7
<i>José Enrique Villarino Valdivielso</i>	
<b>Development and application of energy optimization models in a railway environment: from railway design to ecodriving .....</b>	23
<i>Duarte Silva, Carlos J. N. Martins</i>	
<b>Mantenimiento: el reto actual de las modernas infraestructuras y redes ferroviarias en España .....</b>	33
<i>Francisco Javier González Fernández, Julio Fernández Losa</i>	
<b>Dispositivo Detector de Descarrilamiento y Frenado Automático de Trenes: 3DyFAT ....</b>	39
<i>Luis José Cao Martínez y Patricia Morala Arguello</i>	
<b>Nuevas prescripciones de estabilización de suelos con cal para rellenos de terraplén en líneas de alta velocidad de ADIF .....</b>	45
<i>Francisco Cabrera Jerónimo; José Javier Navarro Ugena; José Estaire Gepp; María Santana Ruiz de Arbulo</i>	
<b>Influencia del trazado en la calidad geométrica de vías férreas .....</b>	55
<i>Fernanda Viana Rodrigues, Adelino Ferreira</i>	
<b>Fault diagnosis in track circuits based on fuzzy models .....</b>	65
<i>Nuno Silvério Barreto; José Maria Coutinho Guerra</i>	
<b>Creación de Mapas de Riesgo Ferroviario a partir de mapas de calor de incidencias .....</b>	87
<i>José Gómez Castaño</i>	
<b>Representación de datos meteorológicos en la operación de ferrocarriles. Detección de caídas de rayos .....</b>	95
<i>José Gómez Castaño</i>	

## SUMMARY

<b>Deregulation of rail passenger .....</b>	7
---	---

*José Enrique Villarino Valdivielso*

**Abstract:** This article is organized in three sections: in the first it comments the impact that the different deregulation options may have going from timid liberalization to more radical options like the British. The second one analyzes service related aspects. The solutions to these problems should guarantee that the public sector should not have to cover from its budget the possible failures of the private agents or the ones transferred to other administrations; in such a way that the regulator – FOMENTO in Spain- develops an orderly de-regulatory process, coherent and viable. Finally, the third section establishes some final recommendations about some strategies to develop this process for passenger rail services. And we say that in case of being implemented Is it in moments of crisis the best opportunity to implement this type of services?

**keywords:** Deregulation, liberalization, privatization, transfers, passengers, rail.

<b>Development and application of energy optimization models in a railway environment: from railway design to ecodriving .....</b>	23
--	----

*Duarte Silva, Carlos J. N. Martins*

**Abstract:** This paper aims to describe and to analyze some of the characteristics and results concerning the development and application of new mathematical models conceived for the optimization of running speed profiles as well as the traction energy consumed in the railway operation. First we show the basic principles and strengths of the models and afterwards discuss the importance of the use of different mathematical models in the whole process of energy optimization showing the results of some trials already done. In the swifter models we emphasize their potential in an in-cab optimization use which gives them ecodriving potential.

Finally important conclusions are drawn regarding the potential savings in energy consumption, especially for different types of rolling stock, infrastructure conditions and schedules.

**keywords:** Optimization, algorithm, ecodriving, energy, railway.

<b>Maintenance: the current challenge of modern infrastructure and rail networks in Spain .....</b>	33
---	----

*Francisco Javier González Fernández, Julio Fernández Losa*

**Abstract:** Major rail investment, in the last two decades in our country, has made it possible to have a very strong transportation infrastructure, locally in the regions and large cities providing a communication backbone across Spain. We are now faced with the need to maintain that infrastructure properly, and provide the excellent service for which it was designed and built, the challenge being the associated cost. Current trends and efforts are committed to integrating the existing modern techniques, reengineering and adapting plans in the context of each rail network. In most cases this is still pending in order to improve productivity, innovation and methodology. The paper argues for the need to make the effort to improve and adapt based on rigorous scientific reengineering of processes, so that we maintain good indicators of availability and reliability, as basic ratios of service quality, but at a minimum practical cost.

**keywords:** Railway, tram, metropolitan, maintenance.

<b>Train Derailment Detector and (y) Automatic Braking Device: 3DyFAT .....</b>	<b>39</b>
---	-----------

*Luis José Cao Martínez y Patricia Morala Arguello*

Abstract: 3DyFAT® is the acronym and commercial name for Train Derailment Detector and Automatic Braking Device, a patent of FEVE developed thanks to the experience of FEVE from more than forty years in the railway operation and railway infrastructure administration was born 3DyFAT®. 3DyFAT® system is a mechanical and pneumatic device, able to instantly detect the moment at which derailment occurs, causing automatic and immediate braking of the complete train.

keywords: Train derailment, automatic braking, pneumatic system®.

<b>New prescriptions on lime-stabilized soils for high-speed railways embankments of ADIF .....</b>	<b>45</b>
---	-----------

*Francisco Cabrera Jerónimo; José Javier Navarro Ugena; José Estaire Gepp; María Santana Ruiz de Arbulo*

Abstract: Due to the limited availability of earth materials for embankments of high speed lines, the lime-stabilized soils system is becoming interesting. The cohesive or plastic soils, that contain high clay and lime quantity, present grave problems due to their plasticity, low bearing rate and instability (expansion or contraction). The use of the site materials is recommended from the economical and environmental point of view. For this reason, Adif and CEDEX had work together redacting the new prescriptions on lime-stabilized soils for High Speed Railways core embankments.

keywords: Infrastructure, regulations, Adif, embankments, lime, stabilized soils.

<b>The influence of track design parameters on track geometric quality .....</b>	<b>55</b>
--	-----------

*Fernanda Viana Rodrigues, Adelino Ferreira*

Abstract: In the study of track design parameters it is mandatory that parameterization establishes a good compromise between the safety, comfort and economic parameters of the vehicle-track system. The knowledge of the requests that result from the interaction of the rolling stock and track set is important since the vehicle is subject to several parasitic movements when in motion. These are determined by the movements of the vehicle itself, the track and the track geometry defects. This article presents the results of analysis of some conceptual aspects of track design parameters, including the characteristics of geometric elements, their sequential structure and their effect on the appearance of defects in track geometry. We also underline the importance of harmonizing the values used in design parameters with the stability of the track geometry, depending on its structure and maintenance.

keywords: Track, geometric quality, maintenance, track displacement, cant, gradient, track design parameters.

**Fault diagnosis in track circuits based on fuzzy models .....** 65*Nuno Silvério Barrento; José Maria Coutinho Guerra*

Abstract: The vast importance of people and goods transportation through the railway system is due to factors such as speed, safety, economic and environmental.

Being trains detected/"located" by electrical circuits (called track circuits) using the rails as transmission medium, its operation is affected by changes in track impedance, imposing great susceptibility of operation and high failure rates.

Considering that the fault diagnosis method is modelbased, fuzzy models will be used in this approach. When all process parameters are not known, the use of fuzzy models can be a good choice for modeling. The fault diagnosis in track circuits using fuzzy concepts can contribute to improve the performance indexes of railways, enabling early detection of faults.

keywords: Fuzzy modeling, fault diagnosis, algorithm, control, model, track circuit, signalling, railway, track, reliability, availability, safety.

**Creating Railroad Risk Maps from incident knowledge base heatmaps .....** 87*José Gómez Castaño*

Abstract: One of the most important tasks facing any Infrastructure Manager is to anticipate possible problems that may occur in them. To do this, the most effective is to have preventive procedures can anticipate possible situations. To achieve this goal, having a knowledge base is essential. You need to know what type of incidents have occurred and where.

This article describes how to leverage the geospatial component of this knowledge base using the technique of representing incidents such as heat maps or "heatmaps". The heat maps are graphical representations shown in the areas of greatest activity of a certain variable. In this case there are areas with more incidents, according to various attributes. The result is the generation of risk maps. This article shows how to develop some programs that respond to a procedure to generate heat maps from the basic event data..

keywords: Gis, heatmap, kml, events, risk maps, python, openlayers, google maps.

**Representation of meteorological data in the railways operation. Lightning strikes Detection .....** 95*José Gómez Castaño*

Abstract: Within the rail related operations, meteorological data are increasingly application. Solutions have traditionally been developed based on cooperation agreements between railway companies and AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). With availability through server AEMET details of new products, both prediction and observation, there are very reliable sources with very low cost. This opens a wide spectrum of possibilities, complementary to existing ones. This paper shows how to develop a system that allows the use of data automatically from capture from AEMET servers until publication. As an example we have used data on lightning detection. <http://www.astroide.es/trenes/rayos.php> The tools used were chosen to minimize the cost, being composed of a spatial database PostGIS, Geoserver a Server, all running on a Linux server. The development of the tools has been done in Java, Python and PHP.

The set of tools and procedures enables the various rail related companies, both public and private, better use of meteorological data in planning their operations.

keywords: SIG, meteorology, lightning.

## Desregulación del mercado ferroviario de viajeros

### *Deregulation of rail passenger*

José Enrique Villarino Valdivielso\*

Economista y Consultor  
Ex Jefe de Planificación de Cercanías de RENFE Operadora (1994-2005)  
Ex Jefe del Gabinete de Proyectos Estratégicos  
de la Dirección General de los Servicios de ALTA VELOCIDAD- LARGA DISTANCIA  
de RENFE Operadora (2006-2008)

#### Resumen

*El artículo se organiza en tres secciones que se refieren a los siguientes aspectos: la primera de ellas comenta el alcance que pueden tener las distintas alternativas de desregulación según los grados, que van desde tímidas medidas liberalizadoras a las más radicales privatizaciones, al estilo de la experiencia británica. En segundo lugar se abordan algunas cuestiones que afectan actualmente a los distintos tipos de servicios. Las soluciones a estos problemas deben garantizar que no tengan que retornar a los presupuestos públicos los posibles negocios fallidos de los agentes privados y los transferidos a otras administraciones, de tal manera que el órgano regulador –FOMENTO en el caso español– desarrolle un proceso des-regulador ordenado, coherente y viable. Finalmente, en la tercera sección se establecen unas recomendaciones finales sobre algunas estrategias para llevar a cabo este proceso en el ferrocarril de viajeros. Y decimos, de llevarse a cabo porque ¿es quizás en tiempos de crisis la mejor oportunidad para llevar a cabo este tipo de proyectos?.*

*Palabras clave:* desregulación, liberalización, privatización, transferencias, viajeros, ferrocarril

#### Abstract

*This article is organized in three sections: in the first it comments the impact that the different deregulation options may have going from timid liberalization to more radical options like the British. The second one analyzes service related aspects. The solutions to these problems should guarantee that the public sector should not have to cover from its budget the possible failures of the private agents or the ones transferred to other administrations; in such a way that the regulator –FOMENTO in Spain– develops an orderly de-regulatory process, coherent and viable. Finally, the third section establishes some final recommendations about some strategies to develop this process for passenger rail services. And we say that in case of being implemented Is it in moments of crisis the best opportunity to implement this type of services?*

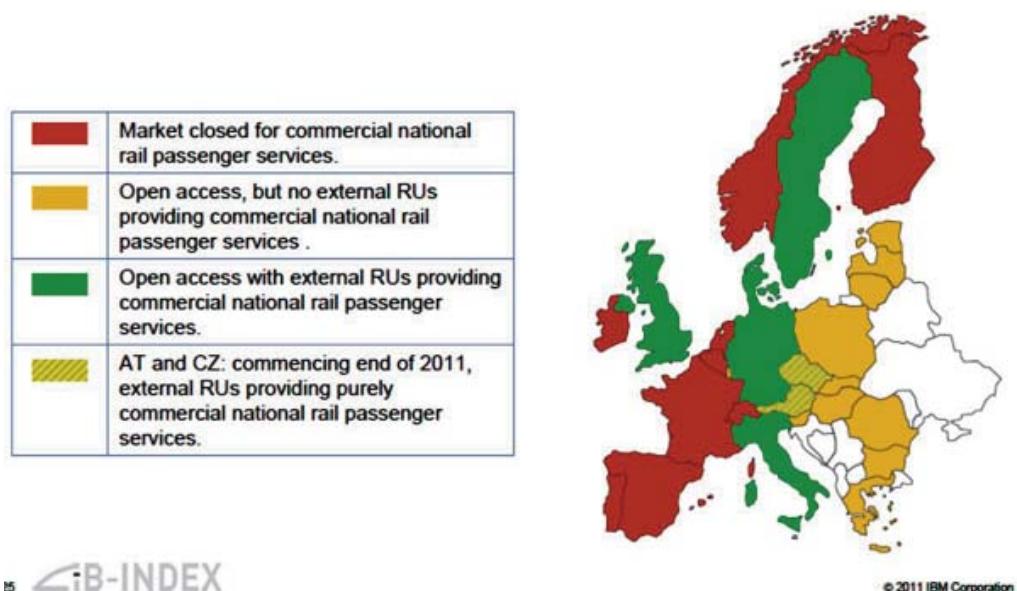
*keywords:* deregulation, liberalization, privatization, transfers, passengers, rail

\* [jevillarino@yahoo.es](mailto:jevillarino@yahoo.es)

## Resumen sobre el estado del arte en Europa: 2011

En lo que se refiere a apertura de los mercados, se producen tres situaciones:

- a) Mercado cerrado para los servicios comerciales de transporte nacional de pasajeros por ferrocarril.
- b) Libre acceso, pero no para empresas externas proveedoras de los servicios nacionales de pasajeros por ferrocarril.
- c) Acceso abierto a las empresas ferroviarias externas proveedoras de servicios nacionales de pasajeros por ferrocarril.
- d) AT y la República Checa: a partir de finales de 2011 permitirán a los operadores externos proporcionar servicios exclusivos comerciales de viajeros nacionales por ferrocarril.

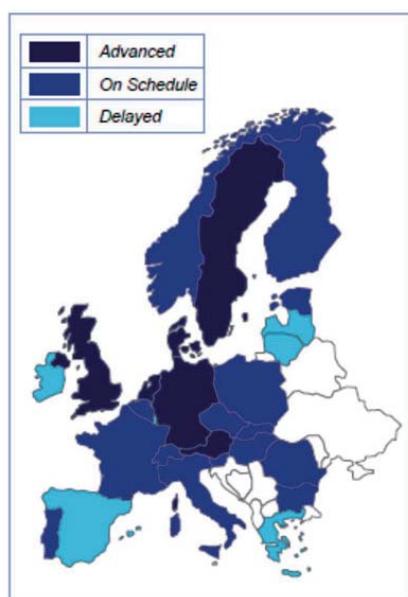


15 

© 2011 IBM Corporation

**Figura 1.** Mapa de los grados de acceso al mercado

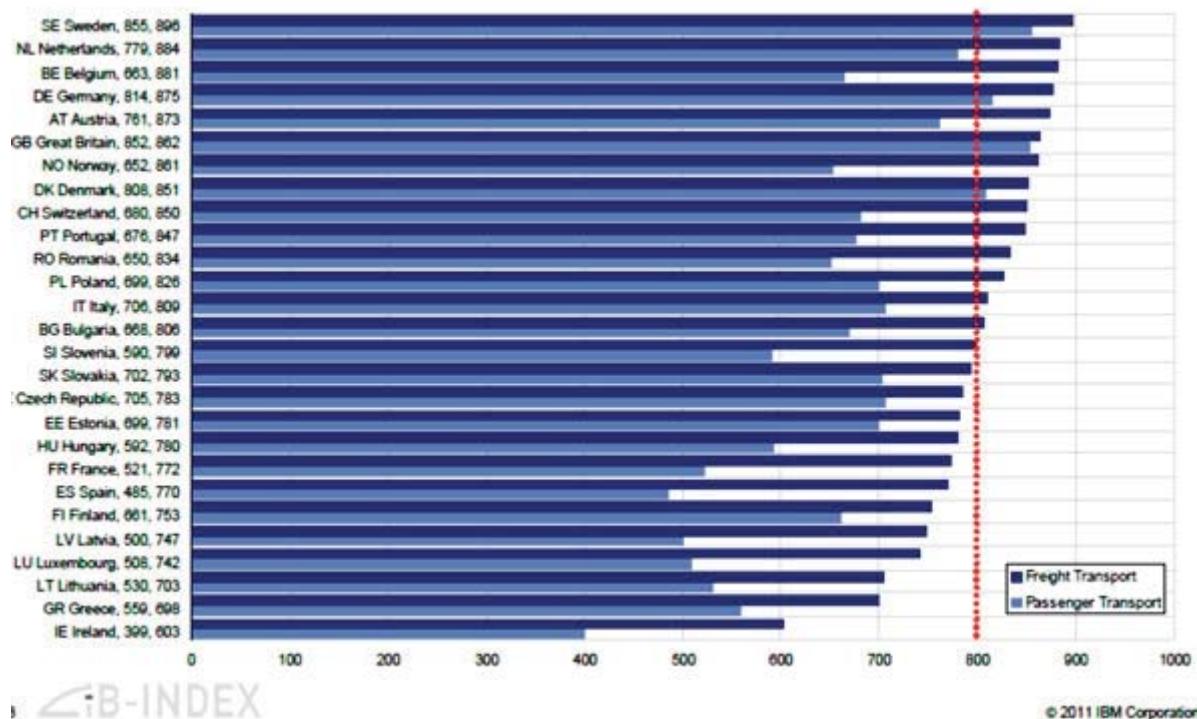
Fuente: Rail Liberalisation Index 2011. IBM Global Business Services



31 

**Figura 2.** Niveles de liberalización: Resumen

Fuente: Rail Liberalisation Index 2011. IBM Global Business Services



**Figura 3.** Índice LIB 2011 de pasajeros y mercancías  
Fuente: Rail Liberalisation Index 2011. IBM Global Business Services

- a) Los países líderes en términos de liberalización del ferrocarril tienen una elevada cuota de mercado externo.
- b) En términos generales, existe una significativa correlación positiva entre los resultados de la LIB y el índice de COM.
- c) La mayoría de los países fueron capaces de mejorar su puntuación en comparación con la edición de 2007 del Índice de LIB. Países con los organismos reguladores fuertes e independientes, ocupan altos puestos en el índice de LIB.
- d) No se observa correlación identificable entre los principales países con diferentes modelos de organización respecto a la separación entre infraestructura y operación y el grado de apertura de los mercados. Las grandes diferencias se producen entre la apertura del mercado de los pasajeros y el transporte de mercancías por ferrocarril si bien los países líderes tienen pequeñas diferencias entre transporte de mercancías y pasajeros.
- f) El transporte internacional de viajeros puramente comercial, de acuerdo a la Directiva 2007/58/CE es posible en la mayoría de los países, realizándose principalmente mediante cooperaciones internacionales de las operadoras.
- g) Hasta la fecha, el transporte exterior ferroviario de pasajeros puramente comercial es bastante marginal, a pesar de que se permite por ley en la mayoría de los países. Sin embargo, en AT, DE, IT y CZ están planeando la entrada en este segmento del mercado.
- h) En algunos países los servicios nacionales de pasajeros por ferrocarril en virtud de un contrato de servicio público sigue siendo reservado para el titular, ya sea por ley o por concesiones. Este es el caso de NL, BE, CH, FI, FR, NO, ES, PL y ES.

i) Los países de la antigua Europa oriental continúan enfrentándose a una disminución del tráfico ferroviario en comparación con otros modos de transporte. Sin embargo, en la mayoría de los países del norte, los países de la Europa central y meridional, se incrementó la distribución modal del ferrocarril.

## Sección 1: Alcance de las alternativas des-reguladoras

### 1.1. Introducción

Han pasado ya ocho años de la aprobación de la Ley 39/2003 de 17 de Noviembre y, algunas cosas han cambiado en el panorama ferroviario: la irrupción de un nuevo modo, la Alta Velocidad de viajeros en las principales relaciones, a pesar de la no existencia de mercado suficiente en todas ellas y la liberalización del transporte de mercancías. Nuevas operadoras han certificado su aptitud para operar en este segmento, pero los grandes números del mercado siguen siendo los mismos o casi los mismos. Es más, el régimen de oligopolio –cuasi monopolio- en que se ha venido operando desde la fundación de la Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles allá por el año 1941 se ha visto reforzado por las alianzas, algunas nada desdeñables, de RENFE con otras operadoras públicas extranjeras de mercancías. No puede hablarse por tanto, *estrictu sensu*, de privatización. A fecha de hoy el tamaño del negocio público es mayor si cabe todavía. No obstante no es a esto a lo que se refiere esta comunicación sino al amplio abanico de incógnitas que se abren de cara a los próximos años en el transporte de viajeros por ferrocarril.

### 1.2. Liberalizar, privatizar o transferir ¿qué?

2010 era el año fijado para la des-regulación<sup>(\*)</sup> de viajeros, pero cuál va a ser el contenido de esa desregulación es quizás la pregunta más difícil de contestar. No mucho menor es la dificultad de contestar a esta otra: ¿qué liberalizar, privatizar o transferir? Quizás ambas cuestiones estén relacionadas y pudiera ser que el contenido de los grados de liberalización sea, más que nada, una función de aquello que se liberalice, se privatice o se transfiera. El negocio del transporte de viajeros y sobre todo el ferroviario tiene negocios que no son “negocio” en modo alguno y otros, pocos, que, por el contrario, ya lo son.

Tampoco el recurso a las experiencias comparadas nos pueden arrojar mucha luz en este asunto ya que el batacazo de la experiencia privatizadora británica, con su origen en una errónea privatización de la infraestructura, ha retraído los ya de por sí escasos impulsos del resto de administraciones ferroviarias y gobiernos europeos, que nunca han destacado, lógicamente sobre todo las primeras, por sus afanes liberalizadores y privatizadores.

Por liberalización se entiende la flexibilización de las condiciones de entrada en el mercado de transporte ferroviario, flexibilización tarifaria, condiciones de explotación, etc, en un contexto en el que todavía existe una presencia prevalente de las administraciones públicas y en las que éstas siguen conservando la titularidad de las explotaciones. Una mayor liberalización es aplicable respecto de todos los tipos de servicios.

---

(\*) Preferimos utilizar el término “desregulación” como expresión con significado neutro, dejando el término “liberalización” para una de las categorías desreguladoras de los mercados.

La descentralización considera las transferencias de titularidad entre administraciones, como regla general desde el Estado a las administraciones autonómicas o regionales, para explotar, fundamentalmente, los servicios de Cercanías de las grandes aglomeraciones metropolitanas y las principales áreas urbanas españolas, pero en la que caben también buena parte de los servicios convencionales urbanos e interurbanos.

El capítulo de las concesiones administrativas es la figura más utilizada en el mercado del transporte regular por carretera, aunque nada impide considerar como tales los denominados contratos-programa que tanto la administración central como las autonómicas suscriben con las explotadoras públicas –en el caso de las privadas la figura dominante suele ser la concesión - de los servicios ferroviarios de cercanías, urbanos e interurbanos (media distancia), conservando la administración central la titularidad de los mismos, subvencionando determinados servicios –caso de CCAA- o la totalidad de ellos –caso de las cercanías-.

La colaboración público-privada, mediante la creación de empresas con capital mixto, se concreta, dentro del ámbito ferroviario, en las alianzas de las operadoras públicas que todavía integran en el negocio los talleres de mantenimiento de sus vehículos, con las empresas de capital privado, fabricantes del material móvil. Este tipo de alianzas, que son frecuentes en el mercado ferroviario europeo y español, también se producen, aunque en menor medida, en el ámbito de la explotación entre operadoras públicas de distintas nacionalidades como es el caso de las sociedades filiales que explotan servicios internacionales de viajeros.

En el último escalón del gradiente, está la privatización de los servicios, entendida ésta en el pleno sentido del término, mediante la transferencia de la titularidad, gestión y la venta de los activos a la iniciativa privada para su explotación. Esta figura de la privatización pura y dura conlleva no pocas dificultades a la hora de la valoración de los activos, la segregación de los empleos públicos a la esfera privada así como la comunicación a la sociedad de las ventajas económicas y sociales de la privatización.

	Tipo de Servicios					Metr. lig / Tranvía
	Cercanías	Media distancia	Larga dist. Conv.	Alta Velocidad	Metropolitanos	
<b>Grados de desregulación</b>						
<b>Liberalización</b>						
<b>Descentralización</b>						
<b>Concesión admva.</b>						
<b>Gestión mixta público- privada</b>						
<b>Privatización</b>						

**Tabla. 1.** Grados plausibles de desregulación de los Servicios Ferroviarios de Viajeros  
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 1 muestra la adscripción más “acomodable” de cada una de las figuras desreguladoras a los distintos tipos de servicios ferroviarios en la que se puede apreciar que las medidas liberalizadoras del mercado encajan en todos los tipos de servicios. La descentralización de servicios a favor de otras administraciones –Estado a CCAA- se acomodian esencialmente a los servicios de cercanías o los urbanos e interurbanos, ya que la larga distancia convencional y la AV al atravesar territorios intercomunitarios son por ley de competencia estatal. Los metropolitanos y los metros ligeros y tranvías suelen estar en manos de las CCAA los primeros, y los ML y TR bajo fórmulas mixtas o privadas en su totalidad. Finalmente, son servicios candidatos a ser plenamente privatizables los servicios de Alta Velocidad , así como los tranvías y metros ligeros, si bien la mayoría de éstas infraestructuras son explotadas bajo la figura concesional por las administraciones autonómicas o municipales.

## Sección 2:

### Algunas cuestiones que definen a los servicios actuales

#### **2.1. Los servicios de cercanías, urbanos e interurbanos: de los contratos-programa con el estado a las transferencias a las CCAA**

En el modelo español todo parece a apuntar a que las cercanías serán objeto de descentralización mediante su transferencia a favor de las CCAA que los soliciten, para pasar a detentar las Autoridades y los Consorcios de Transporte al menos las competencias tarifarias y de planificación. Cataluña ha sido la primera transferencia, incluida la titularidad del servicio, de RENFE Operadora desde Fomento a la Generalitat, en una primera fase, a establecer con la Generalidad un contrato-programa para establecer los compromisos técnicos y de calidad respecto de los servicios que discurren por el ámbito de dicha comunidad autónoma, al igual que en la actualidad tiene suscrito RENFE Operadora con el Ministerio de Fomento. En este modelo, la titularidad del servicio pasaría del Estado a favor de la CA junto con los recursos que cubren el coste de los servicios y RENFE Operadora seguiría siendo la empresa prestadora del servicio, si bien con las facultades planificadoras y gestoras transferidas al órgano competente del gobierno autónomo catalán.

No parece que esta situación sobreviva a más largo plazo por cuanto las aspiraciones de las actuales instituciones políticas catalanas persiguen mayores cuotas de descentralización que se orientan hacia una transferencia en grado pleno, de todos los recursos productivos –trenes y personal- y financieros, además de la titularidad y gestión ya descentralizadas en la primera fase. Existen otras alternativas que se exponen más adelante.

La evolución del número de viajes de Cercanías en los últimos ocho años -que publica el INE mensualmente- muestra un cambio de tendencia a partir del inicio de 2006. Cabe pensar que ello responde al agotamiento de un modelo de negocio que sirvió para mantener un crecimiento que respondía a amplias demandas de movilidad y a una gestión que no se corresponde ya con un ciclo de negocio en fase madura, que requiere de una nueva estrategia y nuevos planteamientos. Se trata de recuperar los objetivos de eficiencia, hoy relajados, de volver a niveles adecuados de calidad y puntualidad –la medición oficial y publicada de la puntualidad adolece de cierta manga ancha- y racionalizar la producción y la aplicación de los recursos ante unas perspectivas de retraimiento de la actividad en años de profunda crisis económica. De no ser así, ante el horizonte de transferencia a las autonomías, los déficits de estos servicios se pueden agrandar todavía más ya que la injerencia política previsible en su gestión por parte de las autonomías puede agravar, todavía más, sus déficits actuales de explotación. Conviene a este respecto no olvidar que las financiaciones autonómicas beben, tarde o temprano, de los recursos estatales.



**Gráfico 1.** Cambio de ciclo en la demanda de los Servicios de Cercanías de RENFE

Fuente: Estadística del transporte de viajeros. Series mensuales. INE.

## 2.2. AVANT ¿Por qué la subvención?

Hoy por hoy, la Dirección General de Viajeros integra los servicios de Cercanías de Madrid y Barcelona, urbanos e interurbanos –los antiguos trenes regionales- y el producto AVANT. Las cuentas agregadas de los tres negocios –dos subvencionables y uno no- restan la obligada transparencia de las cuentas de cada uno de ellos, ya que la subvención de Cercanías y las líneas de la antigua media distancia convencional, es absolutamente incompatible con una actividad en la que no concurren las condiciones de servicio público.

AVANT, cuya irrupción ha hecho cambiar la tendencia decreciente de la demanda de regionales al sumarse los viajes de ambos negocios no es un negocio sostenible por las cuantiosas inversiones en material rodante y su baja ocupación, como ponen de manifiesto las débiles demandas de las relaciones Barna-Lleida (26.500 mes), Barna-Camp Tarragona (6.500) y Lleida-Tarragona (1.800), en un corredor con alta movilidad interna. No parece razonable que cuantiosas inversiones se destinen a tan exiguos fines sociales y los financien ciudadanos de Burgos, Lugo o Zamora, que no tienen ni Cercanías, ni AVANT. La gestión de esta actividad debe ser claramente segregada de las otras dos y ser sostenible por sí misma. Ni la doctrina ni la realidad de los hechos admiten hoy día subvenciones cruzadas.



**Gráfico 2.** Evolución de la demanda de los Servicios de Media Distancia de RENFE Operadora

Fuente: Estadística del transporte de viajeros. Series mensuales. INE. Fig. 2

La Alta Velocidad, por razones obvias, sea del ámbito que sea, no debe ser objeto de subvención. No obstante, quizá, el primer despropósito radica en la propia concepción de AVANT: usar vehículos de altas velocidades, con altos costes de inversión y mantenimiento para distancias medias-cortas de baja demanda, además del que supone restringir la capacidad de tráfico y crecimiento de frecuencias de la AV de Larga Distancia, ocupando surcos de mayor rentabilidad para el otro operador de LD. El autor mantiene que estos servicios, de existir como tales, deben ser rentables y tener el mismo tratamiento que la alta velocidad de larga distancia y la misma estrategia de desregulación. En cualquier caso, es necesaria y urgente una profunda revisión y reflexión sobre el posicionamiento estratégico, tarifario y de mercado de ambos servicios de alta velocidad.

### **2.3. Lo convencional: la media y larga distancia, condenadas a la subvención**

Los servicios interurbanos convencionales parecen acomodarse mejor a fórmulas concesionales o convenios por los que las administraciones autonómicas sufragan los costes no cubiertos por los ingresos de tráfico, mediante subvenciones aplicadas a líneas específicas que cada gobierno autonómico considere como servicios de utilidad pública.

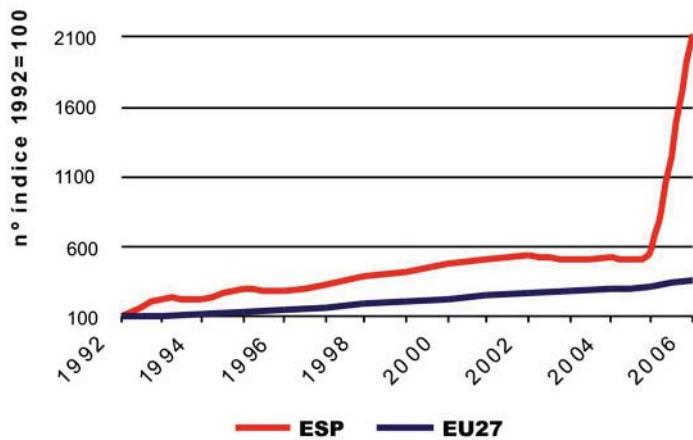
La larga distancia convencional parece estar condenada a la subvención y a permanecer bajo la competencia del Estado central, en primer lugar por la propia determinación de la LSF al retener las competencias de aquellos servicios cuyas líneas discurren por territorios de dos o más autonomías y, en segundo lugar por el escaso atractivo que suele tener la explotación de estas líneas por los operadores privados, debido a los déficits que su explotación comporta. En este segmento del mercado ferroviario sólo son previsibles tímidas y limitadas medidas liberalizadoras, hasta que el desarrollo de las nuevas infraestructuras de AV previstas en el PEIT sustituyan prácticamente a esta red, pasando a ser una red casi exclusiva para los tráficos de mercancías. Mientras, hasta que quede más o menos completado el mapa de la alta velocidad, procede subvencionar exclusivamente por obligación de servicio público lo estrictamente social.

### **2.4. Los servicios de Alta Velocidad: la guinda de la privatización**

Los servicios de Alta Velocidad ferroviaria son en la actualidad los servicios estrella del ferrocarril, que han hecho resurgir este modo de transporte del largo languidecimiento que ha padecido en los últimos cincuenta años.

España es, después de Francia, el país de la UE con un mayor número de kms de vías de alta velocidad, por encima de Alemania, después de la puesta en servicio de las líneas Córdoba–Málaga, Madrid-Valladolid a finales de 2007, el tramo Tarragona-Barcelona en Febrero de este año, y, más recientemente la alta velocidad a Levante mediante la línea Madrid-Valencia, hasta completar los 1.521 kms de línea a finales de 2008.

España destaca también por el espectacular crecimiento de la demanda de viajes experimentado en los años recientes desde que en 1992 fuera inaugurada la primera línea Madrid-Sevilla.

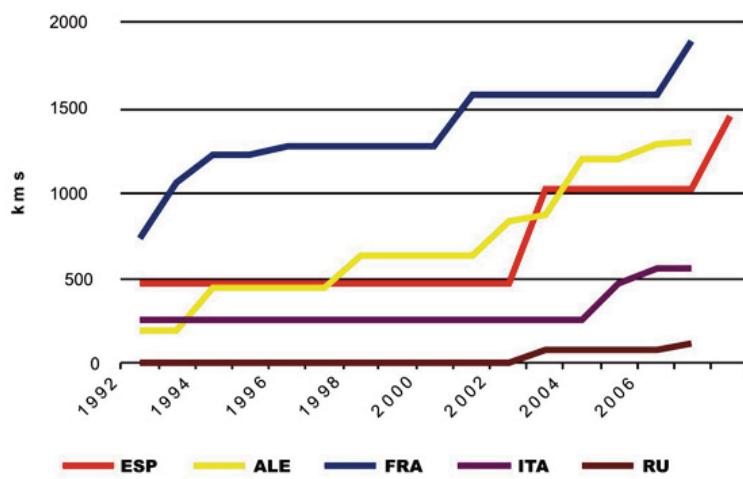


**Gráfico 3.** Evolución de la demanda de viajes de Alta velocidad España – UE27

Fuente: EU energy and transport in figures. Statistical Pocketbook 2007/2008. European Commission.

A lo largo de los más de 16 años desde que en 1992 se inauguró la primera línea de Alta Velocidad Madrid-Sevilla el ritmo de crecimiento de la demanda de viajes ha estado por encima de los valores de la UE como se puede observar en la Fig. 3 en que el crecimiento más reciente presenta valores espectaculares. La demanda de viajes de la línea Madrid-Barcelona a punto ha estado de igualar la cuota del avión, que a lo largo de todos estos meses ha visto reducir su presencia en este potente corredor, el mayor puente aéreo del mundo.

Así pues, los servicios de la Alta Velocidad ferroviaria son uno de los principales, por no decir el único, de los candidatos a ser privatizados.



**Gráfico 4.** Kms de líneas de Alta Velocidad en los principales países de la UE

Fuente: EU energy and transport in figures.

Statistical Pocketbook 2007/2008. European Commission.

## European HS Network

Situation as at 02.2008

- $v \geq 250 \text{ km/h}$
- $v \geq 250 \text{ km/h} \text{ Planned}$
- $180 \leq v < 250 \text{ km/h}$
- Other lines



Information given by the Railways

UIC - High-Speed Updated 22.02.2008 – OG/IB

Figura 4.

## European HS Network

Forecasting 2025

- $v \geq 250 \text{ km/h}$
- $v \geq 250 \text{ km/h} \text{ Planned}$
- $180 \leq v < 250 \text{ km/h}$
- Other lines



Information given by the Railways

UIC - High-Speed Updated 22.02.2008 – OG/IB

Figura 5.

## 2.5. Lo local: Metropolitanos, metros ligeros y tranvías

Se trata de infraestructuras de carácter local, en ámbitos urbanos y/o periurbanos. La titularidad de las infraestructuras y de las explotaciones suele corresponder a las autoridades autonómicas o a los ayuntamientos, que en algunos casos no las explotan a través de empresas públicas, sino mediante concesiones a la iniciativa privada, habiendo casos en que tanto la construcción como la explotación se realiza exclusivamente por el capital privado cuya planificación de servicios se integra en los Consorcios Regionales de Transportes.

## Sección 3:

### Algunas recomendaciones

#### **3.1. Una nota sobre la colaboración público-privada en la explotación de nuevas infraestructuras ferroviarias: ojo a la ingeniería financiera**

De unos años acá, han sido amplios y frecuentes los debates habidos entre los estudiosos, administraciones y operadoras sobre las distintas fórmulas de colaboración entre las administraciones y las empresas públicas ferroviarias y la iniciativa privada en materia de transporte. En no pocas ocasiones los expertos han dibujado complejas fórmulas de ingeniería financiera, cuya finalidad última no era otra que el reparto de los riesgos financieros y que, además, se caracterizaban por integrar bajo una misma operación las fases de construcción de las infraestructuras y su explotación.

En el fondo, las administraciones, tanto centrales como autonómicas, ante tiempos de importantes restricciones presupuestarias buscaban fórmulas y escenarios de financiación que no apelaran directa e inmediatamente a los recursos públicos y difiriesen en sucesivos ejercicios sus costes. De forma general, en esto consiste lo que, en su momento, se dio en llamar *peaje en la sombra*, fórmula de cuño alemán, aplicada con variantes, que parece haber decaído como fórmula estrella en las alternativas de financiación de la construcción y explotación de las infraestructuras de transporte por los malos resultados obtenidos, casi siempre para las administraciones públicas. Las administraciones lograban, en el mejor de los casos aplazar sus desembolsos, incurriendo en nada desdeñables sobrecostes financieros, al tiempo que la iniciativa privada asumía unos importantes riesgos de mercado, compartidos también por las administraciones públicas, dado que normalmente los ingresos que estimaban los estudios previos de demanda no se alcanzaban en la realidad en la fase de explotación de la infraestructura.

El autor, en absoluto, es partidario de estas experiencias para la construcción y explotación de infraestructuras de transporte, cuya financiación debe realizarse dentro de la más solvente y ortodoxa disciplina presupuestaria y financiera a fin de no incurrir en mayores costes que los estrictamente necesarios para los contribuyentes y no derivarlos a las generaciones posteriores. Ello no obsta, para que la explotación de los servicios pueda realizarse bajo las fórmulas más adecuadas a cada tipo de servicio, según veremos más adelante.

#### **3.2. El “modelo de San Martín de la Vega”.**

El modelo que el autor propugnó en su día y denomina de “San Martín de la Vega” se refiere al sistema de explotación de la línea de cercanías que une esta localidad madrileña y el Parque de Ocio Warner a la red de RENFE Operadora en la estación de Pinto. Se trata de una línea que siendo propiedad de la Comunidad Autónoma de Madrid, cuya construcción financió a su cargo y cuya titularidad detenta, es explotada por las Cercanías Metropolitanas de RENFE Operadora. Podemos decir que se trata de unas transferencias “a la inversa”: el estado explota a través de RENFE Operadora una línea cuya titularidad y dominio pertenece a la Comunidad madrileña.

Legalmente, el servicio se presta bajo la figura de un contrato de prestación de servicios establecido entre ambas administraciones por el cual la Comunidad de Madrid requiere de Cercanías de RENFE la operación de los servicios a prestar, el nº de frecuencias y demás parámetros de calidad y prestaciones de la línea. A cambio de ello se acuerda entre ambas partes un precio por los servicios que la Comunidad abona a la

explotadora, a través del Consorcio Regional de Transportes. Frente la modalidad más usual consistente en que la explotadora asume el denominado “riesgo de demanda” en función de los ingresos de los viajes, que son deducidos de los costes de la explotación, en el caso descrito se deslindan nítidamente las funciones y competencias del titular y del explotador. El titular del servicio es quien recibe la totalidad de los ingresos correspondientes a los viajes, tanto de los realizados en la línea como una parte proporcional a los recorridos en la red del otro operador. El explotador, en este modelo, recibe como contraprestación el importe equivalente al coste de sus servicios, que deberá incluir un plus en concepto de retribución a la gestión. En su simplicidad, transparencia y deslinde de competencias reside su máxima virtualidad que puede ser extrapolado tanto a transferencias entre administraciones como a futuras privatizaciones. Buena prueba de la bondad de este modelo es que, cuando la Comunidad de Madrid abandone la explotación, según está previsto, para el año 2012 el tren ya no llegará ni al Parque Warner ni a S. Martín de la Vega, debido a la exigua demanda media de la línea, ello no ocasionará perjuicios relevantes ni sobre costes para la Operadora.

Este modelo cuenta con experiencias en Alemania y Suecia y permite que, por ejemplo, un operador público potente, como es el caso de la primera operadora española, pueda compartir con otros operadores privados la experiencia desreguladora –fundamentalmente en el campo de la Alta Velocidad, (este modelo ya hemos visto que puede aplicarse también a ámbitos de cercanías y otros servicios urbanos e interurbanos, con resultados muy positivos)- y ser aplicado en futuras y deseables experiencias de internalización de RENFE.

### **3.3. Las transferencias de servicios de Cercanías y urbanos e interurbanos a las CCAA pueden disparar los costes de explotación**

Ya se ha comentado que sean los servicios que sean los que se transfieran, bien mediante transferencia plena, es decir, activos y mano de obra, o bien siendo solamente transferidas las responsabilidades de planificación, habrá que tener en cuenta, con mucho cuidado, las condiciones a futuro, so pena de ver en plazo muy corto la explosión de los costes de explotación y, en definitiva, el mayor coste del servicio para todos los contribuyentes, disfruten o no de estos servicios ferroviarios. La razón no es otra que el afán insaciable de la mayoría de las CCAA que suelen “disparar con pólvora del Rey”, que más tarde se traducen en mayores impuestos para los contribuyentes.

Según el autor, la fórmula más adecuada para las transferencias de estos servicios es la citada anteriormente y nada obsta para que las CCAA pasen a detentar tanto la titularidad de los servicios, como las competencias sobre la definición, planificación y tarifas, siendo la explotación y la operación de los servicios, contratados bien mediante la figura del clásico contrato de servicios o bien mediante contrato-programa con un operador, RENFE Operadora, u otra, mediante concurso público, abierto y transparente. En este modelo, que se considera más adecuado y sencillo que el de transferencias “plenas”: titularidad, planificación y recursos –trenes y personal- el Estado debe asegurarse el retorno del valor actualizado de los activos a transferir así como la asunción de todos los costes de explotación por parte del nuevo ente titular.

### **3.4. La desregulación de servicios ferroviarios no deben encubrir ajustes de capacidad a cargo exclusivo del Estado**

O lo que es lo mismo, que el saldo de cada una de las transferencias de servicios ferroviarios a otras administraciones y/o empresas privadas, no deben suponer para el Estado la asunción en exclusividad de los recursos ociosos que se produzcan como consecuencia de ajustes de capacidad, de tal manera que con

la transferencia o privatización de cada servicio se transfieran o privaticen todos activos y todos los recursos afectos a cada uno de ellos. A lo largo de los procesos de desregulación deben estudiarse fórmulas por las que los agentes implicados compartan los costes de los ajustes, caso de ser éstos necesarios.

### **3.5. La Alta Velocidad de Larga Distancia: Privatizar beneficios públicos. La gestión pública no tiene por qué ser más ineficiente que la privada**

Lo público siempre ha tenido un sambenito: la ineficiencia, la ineeficacia, tanto si se refiere a las administraciones como a las empresas públicas, nacidas muchas de ellas en un hospital de empresas como consecuencia de la nacionalización de pérdidas; pero puede que, a no tardar, veamos privatizar beneficios públicos. No, no es un galimatías. Esto último, es lo que puede ocurrir con la privatización de servicios de Alta Velocidad de la Operadora Pública.

Los servicios de Alta Velocidad de Larga Distancia españoles se prestan desde 1992, en que entró en servicio la primera línea Madrid-Sevilla, por RENFE Operadora a través de su Dirección de AV-LD. El PEIT prevé que de aquí a poco más de diez años, aquellos iniciales 471 kms de línea se conviertan en más de 10.000 kms. Pero esto, que para que así sea requiere de cuantiosísimos recursos económicos, no es lo más importante. Lo realmente importante es que la Alta Velocidad va a revolucionar las pautas de la movilidad de las personas en España y la UE. De hecho ya ha comenzado a cambiar las pautas de movilidad de muchos ciudadanos, con efectos en otros modos como el aéreo, al que ya está restando protagonismo en el mercado interior. Un nuevo modo ferroviario emergente se convierte pues en algo más que un nuevo y moderno modo para convertirse, además, en un recurso estratégico del Estado de primera magnitud.

El negocio de Alta Velocidad no tiene sentido si no es capaz de generar los recursos suficientes para, al menos, cubrir los costes de la explotación de un servicio de calidad y el retorno de las cuantiosas inversiones que la han hecho posible. Ojo, que a esta actividad se le pide que pague por una amplia casuística de usos de la infraestructura –usar la vía, aparcar los trenes, los surcos horarios, etc- a diferencia las vías de los coches, las carreteras y autovías, que se sufragán con recursos del presupuesto, es decir, de los impuestos.

Por ello, los posibles procesos de privatización cuyo grado y calendario de implantación depende de las muy presumibles presiones de los lobbies con interés en la actividad –fabricantes de trenes, grandes grupos constructores y grupos financieros- y del grado de respuesta y/o resistencia del gobierno de turno, deben abordarse con cautela y con las debidas garantías para que el estado recupere, al menos, el valor residual de los recursos invertidos. Los grados y niveles de desregulación pueden ser los mismos que los ya expresados para los servicios de cercanías y media distancia. Al menos en los primeros años de la desregulación del sector de viajeros se aconsejan fórmulas del tipo “modelo S. Martín de la Vega” en vez de la venta pura y dura de los activos y la subrogación del personal, con el objeto de mantener mediante la presencia pública un control del proceso, como referencia de la gestión privada. Caso de llevarse a efecto privatizaciones “plenas” de servicios de AV también deben ser de aplicación los requisitos garantistas citados respecto de los ajustes de capacidad. La ilusión monetaria de una temprana obtención de recursos económicos, fruto de privatizaciones de la AV para hacer frente a la fase adversa del ciclo económico, puede comprometer y condicionar una necesaria visión estratégica a más largo plazo.

### **3.6. Internacionalización, el futuro**

Los distintos gobiernos españoles han apostado por el desarrollo de la Alta Velocidad de viajeros, de forma indiscriminada y en detrimento de otros sectores como son las mercancías por ferrocarril, estratégicas en estos momentos de crisis económica. No obstante, cabe aprovechar de forma positiva todo el

conocimiento y experiencia acumulados por el “cluster” tecnológico ferroviario español y liderar el mercado de la alta velocidad ferroviaria mundial, que no es poca cosa. Hasta ahora los pasos dados han ido en el buen camino con el contrato La Meca- Medina y otros proyectos más en cartera. Ligar contractualmente entre sí las fases de construcción y explotación ha sido y es esencial para la supervivencia en España de una potente explotadora pública como puede ser RENFE Operadora, dando entrada a fórmulas societarias compartidas con el sector privado, estrategia que se han mostrado muy eficaz.

### **3.7. A modo de conclusión**

Cualquier política desreguladora del mercado de viajeros habrá de tener en cuenta no sólo los efectos directos, económicos e inducidos, sobre el mercado de transporte y las cuentas macroeconómicas, sino también aspectos estratégicos que juegan en el más largo plazo. Las empresas ferroviarias, de titularidad pública o privada, son corporaciones que necesitan de sistemas tecnológicos, de gestión y de conocimiento avanzados, liderados por equipos de personas altamente cualificados. En este contexto, lo de menos es la titularidad de sus recursos ya que como

hemos dicho la eficiencia y la eficacia son hoy día competencias que se configuran estratégicas frente a una dicotomía de la titularidad del capital, que ya pertenece al pasado. El dilema no es entre lo público y lo privado sino entre lo eficiente e ineficiente, entre la calidad y lo vulgar, entre valor y, simplemente, el precio. El saber hacer en el nuevo ferrocarril no se improvisa. El saber hacer de la explotación, menos todavía.

España está realizando un fortísimo esfuerzo inversor que va a resultar en una notabilísima mejora de la movilidad en la península. Sin embargo, el gran desafío va consistir en conseguir que este esfuerzo inversor sea aprovechado para tener un operador ferroviario de primerísimo nivel que pueda competir con éxito en el nuevo marco liberalizado con DB, SNCF, Eurostar, Veolia y los nuevos operadores privados que sin duda surgirán, y crecer en los mercados domésticos e internacionales. No deseamos que nuestro sector ferroviario siga los pasos de otras empresas, en su momento empresas punteras españolas, convertidas ahora en subsidiarias de grupos internacionales. Queremos que de aquí a unos años contemos con un operador ferroviario que esté en la situación de Telefónica, creciendo y comprando empresas por todo el mundo y generando valor, conocimiento, I+D y empleo de calidad en España. El verdadero paradigma reside en apostar por ser una organización de primera y no de segunda división, una sede puntera o una mera delegación, todo ello después de haber recibido miles de millones de euros –billones de las antiguas pesetas- para dar valor a unas infraestructuras por encima del mero servicio de trasladar de un sitio a otro a personas en el menor tiempo posible. Esta tarea compete a la iniciativa pública que ha liderado este proceso hasta hoy, de igual manera y junto con la iniciativa privada en el futuro. En nuestro caso, de España, para romper las barreras de nuestros corsés topográficos y ser capaces de internacionalizar nuestras competencias más allá de nuestras fronteras. Éste es nuestro reto, que ha empezado con el buen pie de la adjudicación de la línea de AV Medina-La Meca en Arabia Saudí, a la que seguro, seguirán otras en nuevos países. Quizá el más importante reto.

**Bibliografía:**

- “EU energy and transport in figures”. Statistical Pocketbook 2007/2008. European Commission.
- “Estadística del transporte de viajeros”. Series mensuales. INE.
- “Rail Liberalisation Index 2011”. IBM Global Business Services
- UIC, Information given by the railways. High Speed. 2008
- “HIGH SPEED RAIL: INTERNATIONAL COMPARISONS”. Final Report. February 2004
- “Rail interoperability & safety”. Transposition of legislation and progress on the field Kema-RTC. DHV B.V. October 2007 37
- “Deregulation on track? The transformation of European rail”. The McKinsey Quarterly. November. 1997
- Ley 39/2003 de 17 de Noviembre del Sector Ferroviario.
- Real Decreto 2387/2004, de 30 de diciembre, del Reglamento del Sector Ferroviario.





## Development and application of energy optimization models in a railway environment: from railway design to ecodriving

*Desarrollo y aplicación de los modelos de optimización de energía en entornos ferroviarios: del diseño ferroviario a la conducción eficiente*

Duarte Silva (\*), Carlos J. N. Martins (\*)

REFER, EPE

### Resumen

Este documento tiene por objeto describir y analizar algunas de las características y los resultados relativos al desarrollo y aplicación de nuevos modelos matemáticos concebidos para la optimización de funcionamiento de perfiles de velocidad, así como la energía de tracción consumida en la operación ferroviaria. En primer lugar se muestran los principios básicos y las fortalezas de los modelos para posteriormente discutir la importancia de la utilización de diferentes modelos matemáticos en todo el proceso de optimización de la energía mostrando los resultados de algunos ensayos ya realizados.

Finalmente se muestran importantes conclusiones derivadas de los potenciales ahorros en el consumo de energía, especialmente para los diferentes tipos de material rodante, condiciones de infraestructura y horarios.

Palabras clave: Optimización, algoritmo, conducción eficiente, energía, ferrocarril.

### Abstract

*This paper aims to describe and to analyze some of the characteristics and results concerning the development and application of new mathematical models conceived for the optimization of running speed profiles as well as the traction energy consumed in the railway operation. First we show the basic principles and strengths of the models and afterwards discuss the importance of the use of different mathematical models in the whole process of energy optimization showing the results of some trials already done. In the swifter models we emphasize their potential in an in-cab optimization use which gives them ecodriving potential.*

*Finally important conclusions are drawn regarding the potential savings in energy consumption, especially for different types of rolling stock, infrastructure conditions and schedules.*

*keywords: Optimization, algorithm, ecodriving, energy, railway.*

\* [dnlsilva@refer.pt](mailto:dnlsilva@refer.pt) / [cnmartins@refer.pt](mailto:cnmartins@refer.pt)

## 1. Introducción

For some time now there has been a huge concern for energy efficiency among railway operators and many other stakeholders. Nowadays since the dramatic increase of the oil prices the energy problems have taken new proportions and the worries about the environmental consequences of poor management in natural resources are more present. In the past few years, cumulated experience from all over the world has been very helpful and now several practical and theoretical approaches concerning energy optimization in the railway sector can be easily identified. Simultaneously the introduction of new technologies, particularly in the rolling stock, allowed a faster materialization of some theoretical approaches with good results.

Both theoretical and practical approaches have been used with the purpose of finding new methods to optimize the speed profiles of the trains. In the last decades many theoretical solutions were developed based on different kinds of algorithms particularly in metaheuristics with most of them having achieved quite good results. However some of those theoretical solutions are yet not tested from the operating point of view and so there are doubts concerning their performance. On the other hand, after knowing the general ideas of a reasonable optimize energy driving, more practical solutions have been introduced allowing for some interesting results mainly focused on the driver's onsite training. Yet, however interesting these practical approaches still loses a huge part of the potential for energy optimization.

The two models presented in this paper were developed with the sole purpose of optimizing the running speed profiles. The first one is based on linear programming and gives the optimal solution considering the infrastructure geometry, rolling stock characteristics and all the operational restrictions. The second approach resulted in a heuristic which is able to achieve a very good solution while being extremely fast. Thus the second model may be used in real time driving as it's capable to swiftly perform optimized speed profiles and still respect all the restrictions of the infrastructures, operation targets and the rolling stock characteristics (ecodriving).

## Mathematical Models

The main driving options of train which lead to a more rational energy consumption are well known: coasting after achieving the highest points; avoid mechanical braking; start up with the maximum power; cut the power mainly at the highest speeds. However it's extremely difficult for the driver to identify the geometry of the track profile while driving and so to know the exact locations where to change throttle position. Furthermore most often the driver doesn't know the impact of its driving options on the schedule hence he usually adopts a conservative approach considerably restricting the optimization potential of the run. This sort of situations clearly illustrate the relevance of the effort put into the developing of theoretical models to allow the identification of optimized drives that ensure schedule fulfilment and, simultaneously, consider all the infrastructure restrictions.

When formulating mathematical models for energy optimization it is very important to adequately identify the factors which can explain the traction consumption in one railway journey in order for them to be properly considered. Whereas energy optimization is concerned most mathematical formulations found often consider the geometric parameters of the railway, the operation restrictions or the major characteristics of the rolling stock. Over and over again we also see that authors use detailed information in their models such as the rolling stock length (Ko et al, 2004), the energy recovered on a regenerative breaking system or the energy consumed on the auxiliary equipment. Nevertheless the important is that mathematical model considers the inputs which are necessary to ensure the goals.

Although both part of an extensive process of optimization the two developed models presented in this paper assume different philosophies. The first one is called ECOLP (Energy Consumption Optimization Linear Programming) and uses a linear programming approach which allows us to find the optimal solution. When conceiving the goal was to develop a model that could give us the best possible solution considering the infrastructure and the rolling stock restrictions without any driving modes constrain. Hence in this model considers assumptions such as: the driver can increase or decrease power as often as he wants even when humanly impossible. This degree of freedom could lead us to unpractical solutions but at the same time ensures that the best solution we could ever achieve is found. In the equations (1) and (2) we can see in a very simplified way the linear programming approach formulation. The objective is to minimize the energy consumed ( $E$ ) without jeopardizing the established journey time ( $T$ ) and respecting all the speed restrictions ( $V$ ) which are a function of the position of the train and its characteristics also speed related ( $f(x, V)$ ).

$$\text{Objective Function: } \min E \quad (1)$$

$$\text{Restrictions: } T \leq T_{\max} \wedge V(x) \leq f(x, V) \quad (2)$$

The approach integrates the basic concepts of kinematics and follows Newton's Second Law of Motion. As can be seen in the following equations, it was adopted the formulation with the position as an independent variable (in opposition to time as an independent variable). Consequently the speed of a train in a certain ( $x+1$ ) position is calculated concerning the value of the speed in the position immediately before ( $V(x)$ ) and the acceleration or braking capacity ( $a(x)$ ) of the rolling stock. To calculate the acceleration we also need to know the total mass of the rolling stock ( $m$ ) as well as the resistance forces of the train. The resistance forces of a train ( $F_r$ ) comprise foremost the wind resistance and the tangential part of the gravitational force ( $g_{tag}$ ). Knowing the rolling stock traction force ( $F_t$ ) we are able to calculate in every single iteration the total force and thus the value of the acceleration. With the values of the traction force, the mass of the rolling stock and the engine yields ( $g$ ) we can easily calculate the energy ( $E$ ).

$$V_{(x+1)}^2 = V_x^2 + 2 \cdot a_{(x,v)} \cdot \Delta x \quad (3)$$

$$a_{x,v} = \frac{F_{t(x,v)}}{m} + \frac{F_{r(v)}}{m} - g_{tag(x)} \quad (4)$$

$$t = \sum_{x=0}^{x-1} \left( \frac{\Delta x}{\frac{v(x) + v(x+1)}{2}} \right) \quad (5)$$

$$E_x = \begin{cases} \frac{F_{t(x,v)} \cdot \Delta x}{\gamma_t} \text{ se } F_{t(x,v)} \geq 0 \\ F_{t(x,v)} \cdot \Delta x \cdot \gamma_f \text{ se } F_{t(x,v)} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

The geometry of the railway is accurately deemed as well as the rolling stock characteristics. Like most of other mathematical models, the trains are considered as a single point and thus its length isn't taken into account. The energy is the product of the traction force and the distance, times the engine yield (6). When the rolling stock has a regenerative breaking mechanism the ECOLP model is able to calculate the returned energy using a different yield value ( $g_f$ ). Nonetheless, regenerative breaking is only considered till a certain value which can be defined in the model and establish the difference between the electric and the mechanical break.

Since the ECOLP model uses a linear programming approach we had to overcome the obstacle of the nonlinear equations (3), (4) and (5). To deal with this we used two linearization technics: i) variable substitution; and ii) piecewise approximation. Although these technics have some well-known mathematical limitations, they have proved to be quite effective in solving this sort of problems. In its final formulation the model was set up as a multi objective problem solver. The elementary objective function (1) was changed to a general scope function translated by formula (7). The latest includes coefficients related to the cost of energy and time ( $c_E$  and  $c_t$ ). With this option we have developed a model that is able to perform a natural trade-off between the energy consumption optimization and the journey time increase. Consequently a general objective function was reached comprising information about the auxiliary energy consumption, such as cooling or ventilation devices, losses of incomes due to the demand elasticity concerning the travel time, or the reduction of positive economic externalities benefits.

$$\text{Objective Function: } \min (c_E \cdot E + c_t \cdot T) \quad (7)$$

This exact model can then find the optimal speed profile for any journey and thus establish a maximum standard for each case. Therefore it's possible to quantify and analyze the differences between the ECOLP solution and the results of alternative approximated models.

After developing a mathematical model able to find the optimal solution we have looked forward to find a more simplified model. The goal was to ensure good and fast optimized solutions and simultaneously their operational and driving feasibility. This type of problem has been analyzed for many years using heuristics based on dynamic programming (Ko et al, 2004), genetic evolutionary stochastic algorithms (Chang and Sim, 1997; Bo and Wu, 2007; Wei et al, 2009) or swarm intelligence algorithms (Hu et al, 2010) and other metaheuristics. Although these models are able to reach good solutions they are usually complex, stochastic and many times computationally slow. There is then room to develop new models able to achieve faster optimized and deterministic solutions without compromising all kinds of operational restrictions.

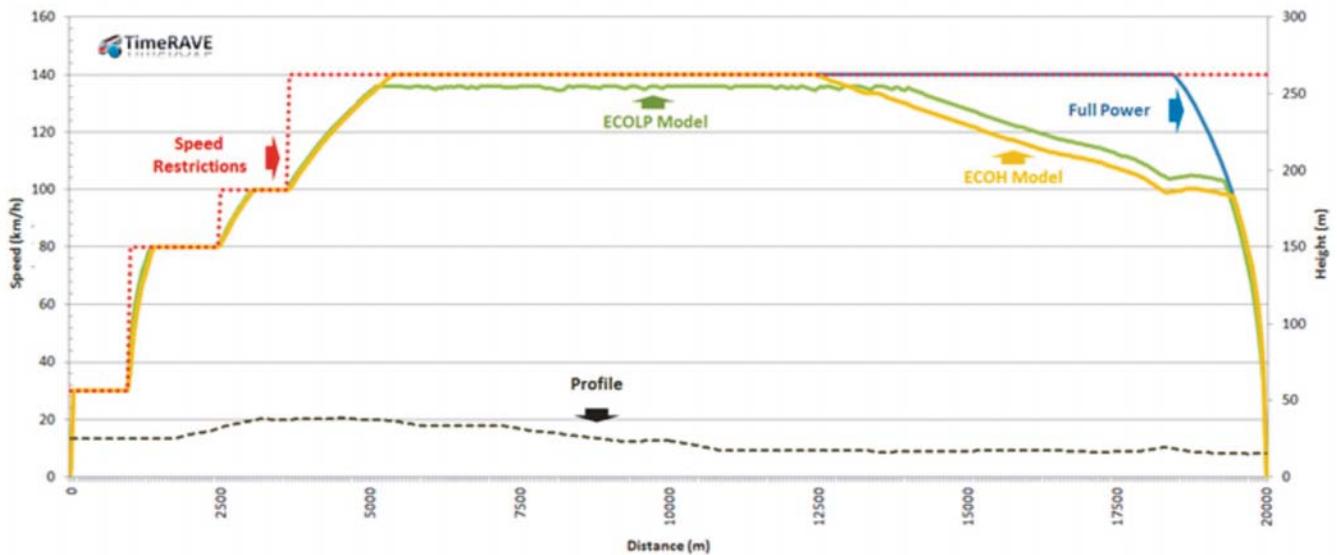
Guided by quality, simplicity and feasibility principles a new model called ECOH (Energy Consumption Optimization Heuristic) was developed. As the ECOLP model, the ECOH approach integrates the basic concepts of kinematics and follows Newton's Second Law of Motion as well. So the speed and energy calculation is based in the same simple equations (3), (4), (5), and (6) using an iterative process with distance increments.

The main philosophy of the ECOH approach is to find the best points where to start coasting or to maintain speed. Thus the calculation becomes simpler than the ECOLP model ensuring at the same time its consistency with real train driving. The ECOH approach is a heuristic with several sequential routines:

calculation of the minimum journey time in full power driving; identification of the section where the train must start coasting; identification of the sections where the train must maintain the speed. These routines are perfectly consistent with railway driving which is also directly with the rolling stock characteristics. Being a quite good representation of the operational reality the model only allows five different kinds of driving: full power (maximum acceleration); constant speed; coasting; regenerative breaking; mechanical breaking. With this approach the computation time is extremely shortened and the results match perfectly with real driving and operation options as well as restrictions.

## 2. Model's performance

The models were tested and validated under different perspectives in order to show their performance, feasibility and suitability to real life situations. Two approaches were followed: detailed analysis of ECOLP model running time and results; comparative analysis of ECOH model faced to ECOLP model, in order to assess the quality and robustness of the results of the former model (Talbi, 2009). Simultaneously the evaluation of the differences between theoretical results and real operational requirements were compared. In all measurements done in real journeys we have tried as far as we could to quantify the energy consumption and thus the potential of the energy saving given by the models.



**Figure 1.** Optimized journeys using the ECOLP and ECOH models

In order to illustrate the behaviors of the two developed models we shall analyze the speed profiles for a particular railway stretch (Figure 1). In yellow we can see the ECOH speed profile and in green the ECOLP profile. Figure 1 shows that from the real driving point of view the ECOLP model gives us a quite feasible result even without any driving restriction in its mathematical approach. The only exception can be easily identify in Figure 1 as it occurs in a section where the proposed driving it's absolutely impossible to perform, approximately between point 5000m and 14 000m. In this section the ECOLP model presents several humanely and technically impossible changes in the speed. To correct this situation the ECOH model suggests the implementation of a constant speed slightly higher than the ECOLP model and starts coasting

earlier. When we have compared the values of the traction energy consumption given by the two models we realize that they are almost alike. This sort of result was found in most of the analysis performed for different types of railways services and rolling stock. Such results allow us to reach the following conclusion; besides returning the absolute maximum value of energy saving, for most cases the ECOLP model is also able to offer, feasible driving solutions.

The second step was to evaluate the performance and the quality of the ECOH model results. Comparing the results between the heuristic and the linear programming approach (ECOLP) we have concluded that their values were very similar. In average the difference among the two theoretical models was under 2% ( $1,00 < E_{ECOH} / E_{ECOLP} < 1,02$ ). Furthermore we found that the differences between the two models were only slightly larger only in two specific situations. The first situation is when we increase the journey time. However only in unusual situations such as when the difference to the full power journey time was higher than 30% did the results show a slight diversion. The second situation occurred mainly in suburban movements where the maximum speed is not too high. Still the results of both models were always very close. From the computational point of view the ECOH model has revealed to be extremely fast even for quite long stretches. This property enables several swift and consecutive energy optimizations making it possible to be used in an in-cab application (ecodriving).

### 3. Real-life Tests

Comparing the theoretical results using the mathematical models with the values of the real time journeys we have clearly identified several situations where it's possible to achieve very significant energy reductions (see Table 1). This type of situation remains true even in scenarios where the operator has already taken measures in order to reduce traction energy consumption. In our tests we used different railway services with different types of rolling stock and in all situations we found great potential savings. The major potential savings were found in long distance services. In these cases we easily found traction energy savings over than 20% comparing to present situations. Although also promising, the results for the suburban services were not so impressive. This mainly happened because the schedules of the suburban services analysed had less freedom. Thus the trains were operating most of the times in full power condition. Yet there were several cases of suburban services where we have achieved greater potential savings without sacrificing the established schedules.

Scenario	Journey Time		Average Speed		Total Length		Consumed Energy	
	Intercity	Suburban	Intercity	Suburban	Intercity	Suburban	Intercity	Suburban
Full Power Journey	87.0 min.	5.0 min.	145 km/h	106 km/h	211 km	9 km	1794 kWh	67 kWh
Performed Journey	92.8 min.	6.2 min.	136 km/h	87 km/h	211 km	9 km	1806 kWh	52 kWh
Optimized Journey	95.5 min	6.0 min.	132 km/h	90 km/h	211 km	9 km	1340 kWh	42 kWh

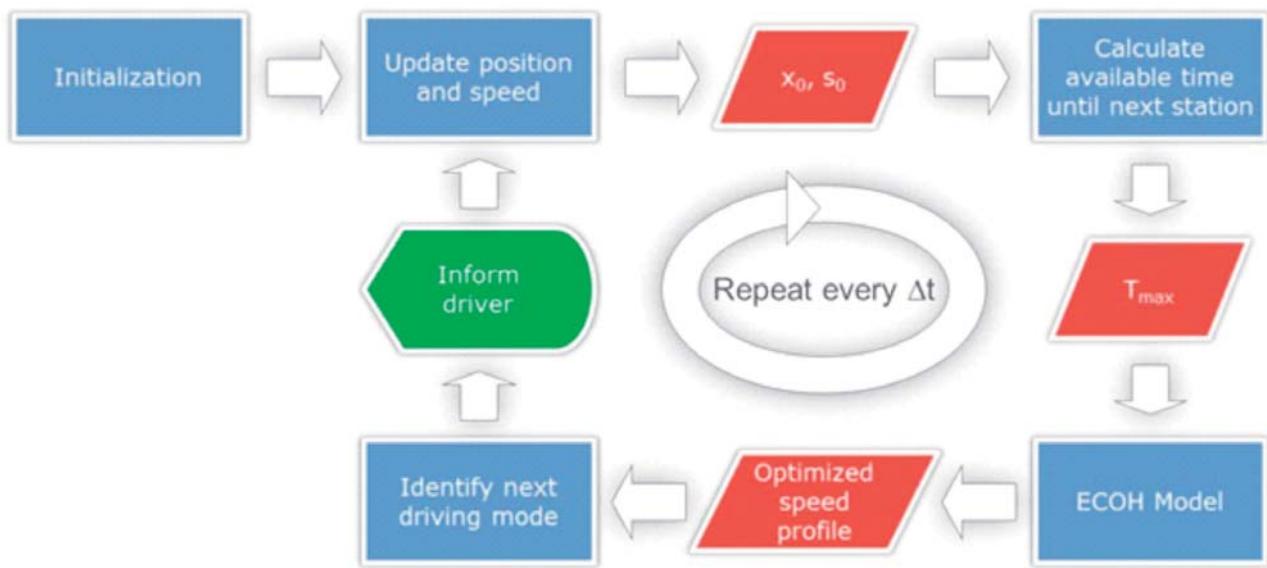
**Table 1.** Real measurements and optimized journeys using the ECOH approach

Although we haven't got real measurements concerning freight services so far, our expectations are very optimistic. Several theoretical tests were undertaken in order to compare full powerjourneys for freight trains and optimize speed profiles. The results have clearly shown a significant energy saving in this kind of service with small time increments on the established schedules. It is our opinion is that this happen especially for two main reasons: first in these cases there is significant energy consumption as a direct consequence of the cargo weight; second we usually find more permissive schedules, hence with more space for optimization. In short, we found evidences that there is a significant portion of energy waste in freight services too. These circumstances could be easily solved with the theoretical approaches exposed in this paper.

#### 4. Ecodriving

Based on the ECOH model presented in previous sections, a prototype of a real-time driver assistant system (Ecodriving) was developed. The system architecture, supported by GPS technology, allows it to work stand alone. The goal behind this architecture is to swiftly perform optimized speed profiles regarding the established schedules without the need to communicate with any train instrument. This way the system can give periodic instructions about the more economic driving options to the driver without compromising any safety condition.

The developed system uses dynamic optimization routines which continuously updates both train position and speed recalculating the optimized speed profile, as illustrated in the next figure.



**Figure 2.** Flowchart of Dynamic Optimization Routines embedded in Ecodriving System

In addition to suggesting the best driving mode at each moment, the system is capable to provide other useful information to the driver. For instance it may also offer the next recommended driving mode along with where and when it will occur, the current and next speed limits, the time and distance to the next

station and to the end of journey, the compliance with the schedule, the driving energy efficiency and so forth. The driver may enhance the information he wants to pay more attention thus ensuring the highest effectiveness of the system.

The prototype is now in an on board testing period. The first tests supported the aptitude of the system to be implemented as an in-cab tool since the optimization algorithm remains extremely fast even in long railways routes. The system also proved to be very efficient in adjusting to perturbations during the journey. Furthermore it was shown that the inputs possibilities of the ECOH model cover the majority of the operational situations such as the rolling stock characteristics, signalling or infrastructure specificities.

## 5. Potential applications

Several important applications of the developed models (ECOH and ECOLP) are foreseen both for operators and railway infrastructure managers. Although most of situations are frequently connected to operator's business, the models may also be used in a wide range of situations by railway infrastructure managers. For instance, in early stages of studies development (feasibility or design) of a future railway line it's possible to analyse and optimize technical options while ensuring its operation feasibility. Consequently, by using this sort of tools and methodologies it's possible to achieve construction cost reductions even in the preliminary steps of the studies. Another possible optimization using these mathematical approaches is the railway schedules where it is possible to achieve the best trade-off between established journey times and the energy consumptions.

For the railway operators, however, it's possible to identify more situations where the developed tools may be used. In fact, there are several perspectives from which these approaches can be quite profitable to an operator. Between all the possible benefits the most important one is the direct consequence in energy consumption of an intelligent driving, which is none the less but the energy bill reduced. As mentioned before, this kind of tool can identify optimized speed profiles of a certain railway stretch. So, for every available schedule the driver is able to perform an optimized journey by knowing exactly where to accelerate, coasting or breaking. Besides if a real-time driving assistant is installed in the train the driver can perform an optimized driving even if changes occur during the journey. Comparing to present situations, results have shown that with these methodologies it's easy to achieve energy saving over 20%.

Another possible use to this type of tool may be to train and to evaluate drivers. The identification of optimized journeys increases the driver's knowledge about ecodriving since it establishes several relations between the speed profile, the infrastructure and the rolling stock own characteristics. Moreover it's possible to use this sort of theoretical approach to stimulate a more rational conscience among the drivers. At the same time the successes and the failures of the drivers could be evaluated by establishing a balance between a real journey and the benchmark, generated by the ECOLP model.

It is also possible to quantify any disturbances on the railway operation using ECOH and ECOLP models. Every change on the schedule can be evaluated. For example we can quantify the extra energy consumed in a delay due to an infrastructure work. But even in these situations it's possible to mitigate the energy consumption and optimize the journey with different restrictions and goals. This type of evaluation is useful for both the railway operators and the infrastructure managers.

## **6. Conclusions**

Two different mathematical models were developed, named ECOLP and ECOH. Both models can easily generate optimized speed profiles considering the infrastructure geometry, rolling stock characteristics and all the operational restrictions. However they have different goals in the energy optimization process and as we have shown the two methods complement each other.

The ECOLP model is able to find the optimal solution but its computational time is high. Furthermore the ECOLP model results have shown that although the model doesn't integrate any driving constraint, the solutions were most of the times feasible from the driver's point of view. These characteristics have revealed that this model could be a very strong tool to solve planning and design problems, such as schedules or technical alignments optimization. In the other hand the ECOH model has demonstrated a very fast computational time and with optimized solutions very close to the optimal. The solutions are also absolutely adjustable to realtime train driving. For these reasons we claim that the ECOH model could be a powerful tool to be used in all situations especially in an in-cab driver assistant system (ecodriving).

Several real-life tests were done and some of them are presented in this paper. The results clearly show that using these two approaches it's possible to achieve an energy saving over 20% for the train operators. Besides the methodologies work very well in all kind of trains and services. We have done several experiences in suburban railway connections as well as in long distance trains with very expressive results. Although only theoretical tests were made concerning freight trains services, reached results revealed considerable energy savings too.

## **References**

- [1] Chang, S.; Sim, S. (1997). *Optimising train movements through coast control using genetic algorithms.* IEE Proc.-Electr. Power Appl Vol. 144, No1, January.
- [2] Chui, A.; Li, K.; Lau, K. (1993). *Traction Energy Management in KCR.* IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control. Operation and Management. Hong Kong.
- [3] Gelman, V. (2009). *Breaking Energy Recuperation.* IEEE Vehicular Technology Magazine. September 2009.
- [4] Hong, D.; Lee, H.; Kwak, J (2007). *Development of a mathematical model of train in the energy point of view.* International Conference on Control, Automation and Systems 2007. Seoul.
- [5] Hu, H.; Fu, Y.; Hu, C. (2010). *PSO-based Optimal Operation Strategy Control for Train.* IEEE 17th International Conference. Xiamen.
- [6] Ke, B.; Chen, N. (2005). *Strategy of train operation under maximum train capacity in mass rapid transit systems.* Joint Rail Conference. Pueblo.
- [7] Ko, H.; Koseki, T.; Miyatake, M. (2004). *Application of dynamic programming to optimization of running profile of a train.* Computers in Railways IX. Dresden.
- [8] Lai, Y.; Ahuja, N.; Barkan, C.; Drapa, J.; Hart, J.; Milhon, L. (2006). *A computer vision system for monitoring the energy efficiency of intermodal trains.* Joint Rail Conference. Atlanta.
- [9] Romo, L.; Turner, D.; Ng, L.S.B (2005). *Cutting traction power costs with wayside energy storage systems in railway transit systems.* Joint Rail Conference. Pueblo.
- [10] Talbi, E. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation.* John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [11] Wei, L.; Qunzhan, L.; Tang, B (2009). *Energy Saving Train Control for Urban Railway Train with Multi-population Genetic Algorithm.* International Forum on Information Technology and Applications.



## Mantenimiento: el reto actual de las modernas infraestructuras y redes ferroviarias en España

### *Maintenance: the current challenge of modern infrastructure and rail networks in Spain*

Francisco Javier González Fernández<sup>a</sup>, Julio Fernández Losa<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Asociación Española de Mantenimiento

<sup>b</sup> Universidad Nacional de Educación a Distancia

#### Resumen

Una mayor inversión ferroviaria, en las dos últimas décadas en nuestro país, ha hecho posible contar con una infraestructura de transporte muy fuerte, localizada en las regiones y grandes ciudades, proporcionando un eje de comunicaciones a través de toda España. Nos enfrentamos ahora a la necesidad de mantener esa infraestructura de la forma adecuada, y ofrecer el excelente servicio para el cual fue diseñada y construida, con el reto de los costes asociados. Las tendencias actuales y los esfuerzos se centran en la integración de las técnicas modernas existentes, reingeniería y planes de adaptación, en el contexto de cada red ferroviaria. En la mayoría de los casos esto aún está pendiente con el fin de mejorar la productividad, la innovación y la metodología. El documento aboga por la necesidad de hacer el esfuerzo de mejora y adaptación sobre la base de una rigurosa y científica reingeniería de los procesos, de forma que se pueda mantener buenos indicadores de disponibilidad y fiabilidad, como índices básicos de calidad de servicio, pero con el mínimo coste práctico.

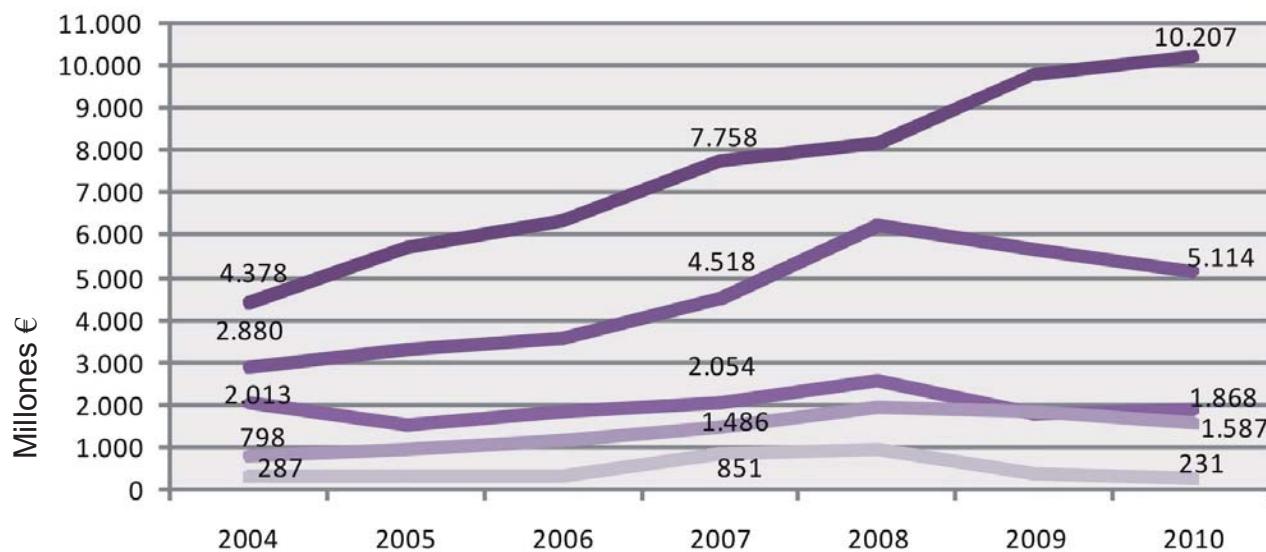
Palabras clave: ferrocarril, tranvía, metropolitano, mantenimiento

#### Abstract

Major rail investment, in the last two decades in our country, has made it possible to have a very strong transportation infrastructure, locally in the regions and large cities providing a communication backbone across Spain. We are now faced with the need to maintain that infrastructure properly, and provide the excellent service for which it was designed and built, the challenge being the associated cost. Current trends and efforts are committed to integrating the existing modern techniques, re-engineering and adapting plans in the context of each rail network. In most cases this is still pending in order to improve productivity, innovation and methodology. The paper argues for the need to make the effort to improve and adapt based on rigorous scientific reengineering of processes, so that we maintain good indicators of availability and reliability, as basic ratios of service quality, but at a minimum practical cost.

keywords: railway, tram, metropolitan, maintenance

Afortunadamente desde la última década del siglo XX, con la aparición de la Alta Velocidad española y su ambicioso programa de despliegue, con el empuje de las Cercanías de RENFE, las ampliaciones de Metros y la puesta en marcha de nuevas redes de Metros ligeros y Tranvías, España está asistiendo a una época dorada del ferrocarril, que nos está convirtiendo en un referente mundial en este Sector. Las inversiones en el Sector del Ferrocarril han sido muy importantes (10.207 MM. € en 2011) y superiores a las llevadas a cabo en otros sectores como Carreteras, Aeropuertos, Puertos y otras infraestructuras, según se observa en el gráfico siguiente (Fuente RENFE 2011)



A esta, más que positiva situación tecnológica de la Alta Velocidad, debemos añadir la situación de unas redes de cercanías, metros y tranvías también con la más avanzada tecnología y prestaciones. Ello, sin lugar a dudas, se debe a dos factores primordiales: en primer lugar por la apuesta decidida de las Administraciones por el ferrocarril urbano e interurbano como medio de transporte de futuro, rápido, seguro, cómodo y muy respetuoso con el medioambiente, como se ha constatado con los datos de inversiones citados. En segundo lugar, por contar en España con un nutrido grupo de Empresas muy beligerantes y capacitadas en todos los sectores asociados al ferrocarril, que hacen posible el diseño, construcción y la puesta en servicio de estos complejos sistemas: Ingenierías, Constructoras, Instaladoras, Fabricantes de material rodante, etc. de forma muy eficiente, con gran calidad y en unos tiempos que han marcado récords mundiales.

Sin embargo creemos que hay una importante faceta pendiente de abordar con imaginación, realismo y criterios de máxima seguridad y rentabilidad; que es la de la optimización de la posterior explotación, entendiendo por tal la operación y, sobre todo, el mantenimiento.

Ya en 2007 la OCDE y el FMI diagnosticaron que en España, como País eminentemente de servicios en el ámbito industrial -aunque muchos se esfuercen en no asumirlo- existían dos grandes carencias que dañaban la industria española; y que son la falta de innovación y la falta de productividad. Ambos problemas pendientes, son cruciales a la hora de plantearse la explotación de las modernas infraestructuras, superestructuras y trenes que estamos poniendo en servicio y que, a nadie debe escapársele, son y serán objeto de mantenimiento durante muchas décadas, después de su puesta en marcha.

La aviación se planteó esta situación ya en 1975, aunque, todo hay que decirlo, con el soporte y apoyo desde el punto de vista de ingeniería de la industria armamentística, que favoreció en EE.UU. la creación de grupos de trabajo y normativos para analizar a fondo el mantenimiento rutinario que se estaba llevando a cabo hasta entonces, en aras de optimizarlo; y optimizarlo suponía mejorar resultados técnicos (fiabilidad y disponibilidad básicamente) y sobre todo reducir costes operativos de forma segura. El reto se consiguió y hoy en día la mayoría de aerolíneas someten a sus flotas a planes de mantenimiento muy optimizados y a costes razonables para la complejidad y responsabilidad de los elementos que tratan.

En los Ferrocarriles, salvo algunas excepciones, esta asignatura sigue estando pendiente. Las nuevas Redes ferroviarias se mantienen a menudo con base en los manuales y prescripciones dadas por los Fabricantes, que, salvo que sean objeto de una exigencia muy determinante y con contraprestaciones económicas claras, se limitan a copiar de unas instalaciones o trenes a otros los planes de mantenimiento que tienen estipulados. Por otra parte es lógico, por razones obvias, pues ellos muy a menudo no disponen de los equipos de expertos precisos para particularizar cada mantenimiento al contexto y singularidad de cada Red y, por qué no decirlo, es una posición cómoda para ellos que, en primer lugar, no tienen que sufragar (salvo en el caso de verse implicados en concesiones) los elevadísimos costes que sus planes sistemáticos y rutinarios implican y, en segundo lugar, muy a menudo se convierten en los propios mantenedores de las infraestructuras, instalaciones o trenes que suministran.



No disponemos de una normativa que especifique y obligue a adoptar unos determinados planes y consistencias, por lo que no deberíamos tener ningún problema para afrontar –eso sí con gran rigurosidad y de forma objetiva y auditabile- revisiones de los planes iniciales de mantenimiento; una vez que la red en cuestión se haya puesto en servicio y se dispongan de datos estadísticos y conocimiento suficiente del contexto real y exigencias de cada Red en concreto. La experiencia nos anima a decir que esto es totalmente realizable, aunque no sea un trabajo fácil y precise un tiempo y un cierto equipo humano de técnicos capacitados y habilitados para ello.

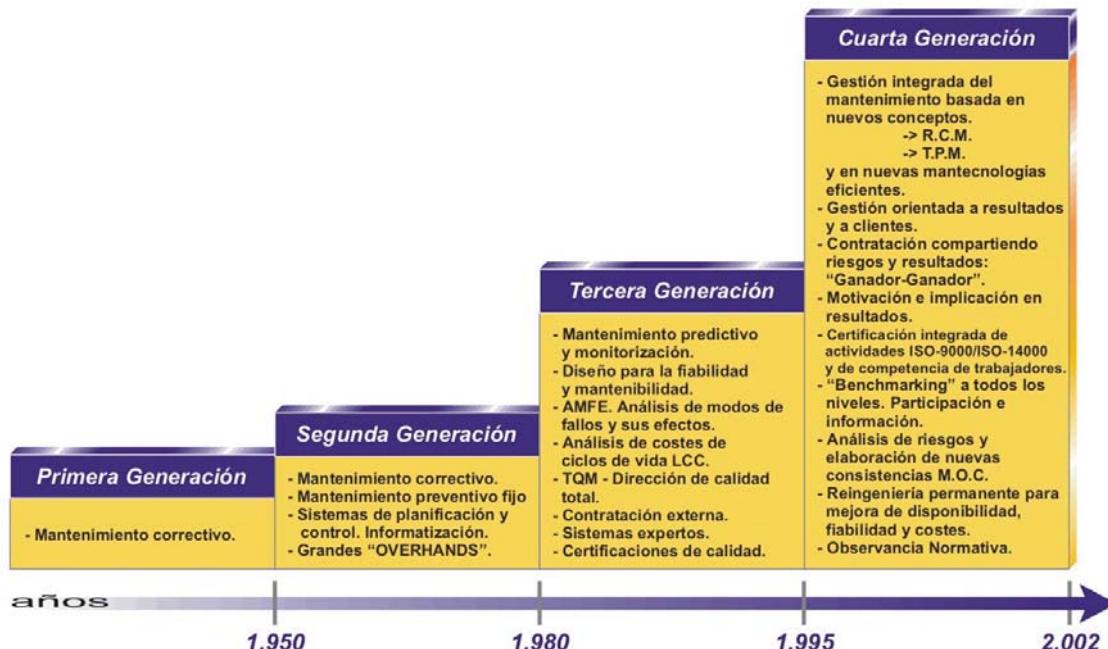
Los históricos métodos de planificación y trabajos del mantenimiento ferroviario deben revisarse a fondo.



Los casos concretos en los que hemos participado, sobre la base de innovación en métodos y tecnologías, e incremento de la productividad de la organización implicada, pueden conllevar ahorros de hasta el 23 %, según ejemplos reales, sobre costes históricos; a la par que mejora en resultados técnicos; algo en principio más que atractivo por la recurrencia en dichos ahorros a lo largo del tiempo, y por precisar una inversión en dedicación de capital humano y tecnología que puede amortizarse en períodos inferiores a los dos años.

No se trata de aplicar "fórmulas mágicas". Podemos denominarlo cuarta generación, y se basa en aplicar las tecnologías probadas y existentes en el campo organizativo y tecnológico junto a la experiencia de los agentes implicados; lo que, con una dosis importante de sentido común y profesionalidad de los técnicos existentes, y predisposición al cambio, puede arrojar éstos en apariencia asombrosos resultados en poco tiempo.

## Tendencias en la Gestión de Mantenimiento



Fco. Javier González Fernández

Muy, muy poco tiempo comparado con las décadas y décadas que tendremos que mantener estos complejos y avanzados sistemas, que estamos poniendo al servicio de los ciudadanos.

En un campo tan sensible como es el del servicio ferroviario debe siempre mantenerse un equilibrio constante entre la fiabilidad, la disponibilidad y los costes (que representamos con la banqueta de la siguiente figura) y, siempre, salvaguardando la seguridad; de forma que cualquier cambio que hagamos cuente con el aval externo -y auditabile- de que ha salvaguardado todas las prescripciones y normativas que en materia de seguridad estén vigentes. Es una cautela quizás obvia, pero que debe anteponerse a cualquier modificación de consistencias y periodicidades que nos planteemos. Una vez garantizado el aspecto de seguridad podremos probar nuevos métodos y técnicas con la seguridad de no provocar ningún incidente; ni mucho menos un accidente, pensando eso sí, que los cambios entrañan un cierto nivel de incertidumbre que debemos evaluar científicamente mediante técnicas RCM, RBM, RAMS o similares, que ya cuentan con experiencias concretas en el Ferrocarril; y asumir – e informar de ello- documentando completamente el proceso, y poniendo a disposición de quien haga falta, de forma auditabile, la metodología llevada a cabo para rediseñar el nuevo y más eficiente Plan de Mantenimiento de que se trate.



Dr. D. Fco. Javier González Fernández  
Presidente de la Asociación Española  
de Mantenimiento (A.E.M.)  
Profesor de las Universidades UPM y UNED  
Director General de 2it Ingeniería.

Dr. D. Julio Fuentes Losa  
Catedrático de Ferrocarriles y Automóviles de la UNED





FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

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

VÍA LIBRE TÉCNICA  
INVESTIGACIÓN FERROVIARIA

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

## Dispositivo Detector de Descarrilamiento y Frenado Automático de Trenes: 3DyFAT®

***Train Derailment Detector and (y) Automatic Braking Device:  
3DyFAT®***

Luis José Cao Martínez y Patricia Morala Arguello

FEVE

### Resumen

3DyFAT® es el acrónimo y nombre comercial de Dispositivo Detector de Descarrilamiento y Frenado Automático de Trenes, una patente de FEVE desarrollada gracias a su experiencia de más de cuarenta años de operación ferroviaria y administración de infraestructura ferroviaria. El sistema 3DyFAT® es un dispositivo mecánico y neumático, capaz de detectar instantáneamente un descarrilamiento en el mismo momento en el que se produce, provocando así el frenado automático e inmediato del tren completo.

*Palabras clave:* *descarrilamiento, frenado automático, sistema neumático*

### Abstract

3DyFAT® is the acronym and commercial name for Train Derailment Detector and Automatic Braking Device, a patent of FEVE developed thanks to the experience of FEVE from more than forty years in the railway operation and railway infrastructure administration. The system was born 3DyFAT®. 3DyFAT® system is a mechanical and pneumatic device, able to instantly detect the moment at which derailment occurs, causing automatic and immediate braking of the complete train.

*Keywords:* train derailment, automatic braking, pneumatic system

## 1. Introducción

No se trata de un sistema de prevención de descarrilamientos sino un sistema que evita y reduce los daños y consecuencias causadas por los descarrilamientos. 3DyFAT® fue desarrollado porque los sistemas existentes era demasiado complejos, muy caros y sobre todo carecían de fiabilidad. Esta fue la motivación de FEVE para desarrollar un nuevo sistema: simple, económico de tal forma que fuera posible su instalación en todos los vagones y con una alta eficacia. Como es sabido, los descarrilamientos suponen tres tipos de costes: por daños en el material rodante, por daños en la infraestructura ferroviaria, y costes medioambientales. Cuando se produce un descarrilamiento el tiempo entre que se produce y es detectado es crítico porque influye directamente en los costes de los daños del descarrilamiento: cuando más grande es este periodo, mayores son los costes asociados al descarrilamiento, debido a que si un descarrilamiento no es detectado instantáneamente el tren puede continuar varios kilómetros con uno o varios vagones descarrilados dañando así toda la vía. Esta es la razón por la que es vital detectar el descarrilamiento tan pronto como sea posible y mejor en el mismo momento que ocurre. Con este propósito fue desarrollado 3DyFAT®, un dispositivo capaz de detectar instantáneamente el momento en el que el descarrilamiento ocurre, provocando el frenado automático e inmediato del tren completo.



**Fig. 1.** Locomotora serie 1900

## 2. ¿Cómo funciona?

Cuando FEVE decidió abordar este proyecto el primer paso fue constituir un grupo de trabajo para conseguir la mejor y óptima solución técnica. Después se elaboró un documento donde se recogieron los requerimientos y especificaciones que este nuevo sistema debía cumplir. Algunos de estos requerimientos fueron: después de un descarrilamiento el sistema tenía que ser fácilmente rearmado y sin necesidad de utilizar ningún tipo de consumibles; el sistema no consumiría aire o consumiría una pequeña cantidad cuando actuase no superior a 1 kg/cm<sup>2</sup>; el sistema tenía que ser resistente a vibraciones y choques; y, finalmente, no usaría dispositivos electrónicos ni conductores eléctricos con lo que no necesitaría baterías ni acumuladores u otras fuentes de alimentación similares.

De acuerdo a estas especificaciones técnicas el sistema desarrollado 3DyFAT® está formado por tres elementos: una campana, un pulsador diseñado específicamente (detector) y una válvula. El elemento más importante es el pulsador cuya misión es examinar la posición del bogie, en relación al bastidor o caja del vagón, tanto respecto a su eje vertical (movimiento relativo debido a las curvas y al serpenteo normal que se provoca en las rectas), como respecto a su eje horizontal transversal al vagón (movimientos relativos de los dos ejes del bogie debidos a irregularidades y a baches de la vía) El mecanismo se dimensiona específicamente para cada tipo de bogie y vía, fijando ciertas tolerancias en función del radio de curvatura mínimo de la vía, de los baches máximos existentes en la misma, y de acuerdo con el tipo de suspensión con que cuente el vagón. Si tales tolerancias son sobrepasadas, circunstancia que sucede únicamente cuando se produce el descarrilamiento del bogie, se transfiere un movimiento longitudinal al pulsador.



**Fig. 2.** Vista del pulsador (posición desarmado) y campana 3DyFAT®

La parte neumática, al percibir dicho movimiento, transmite de modo instantáneo una señal neumática a una válvula automática, que tiene como misión descargar la presión del colector general de aire comprimido, por lo cual, el tren completo recibe la orden de frenado de emergencia, y se detiene. La presión de aire necesaria para el funcionamiento del sistema se toma del depósito de aire auxiliar del propio vagón.

El sistema 3DyFAT® fue instalado por primera vez en el año 2000 y desde entonces opera en toda la flota de vagones de mercancías de FEVE formada por 491 plataformas 2SSag, 36 plataformas Sghmmns, 464 vagones tolva 2TTag, 25 vagones cerrados 2JJag, 17 coches de viajeros Ri 6500 y 3 furgones 2JJag. En este período de tiempo el sistema ha proporcionado un 100% de efectividad, es decir el sistema ha funcionado correctamente en el 100% de los casos de descarrilamiento y nunca ha actuado sin la existencia de descarrilamiento, de tal forma que no es un prototipo sino un sistema validado y fiable. Como patente de FEVE ha sido comercializado en operadores ferroviarios de otros continentes y en España el sistema 3DyFAT® también opera en la flota completa de EuskoKargo, nombre bajo la cual la empresa pública del Gobierno País Vasco Eusko Trenbideak - Ferrocarriles Vascos S.A. opera el transporte de mercancías.

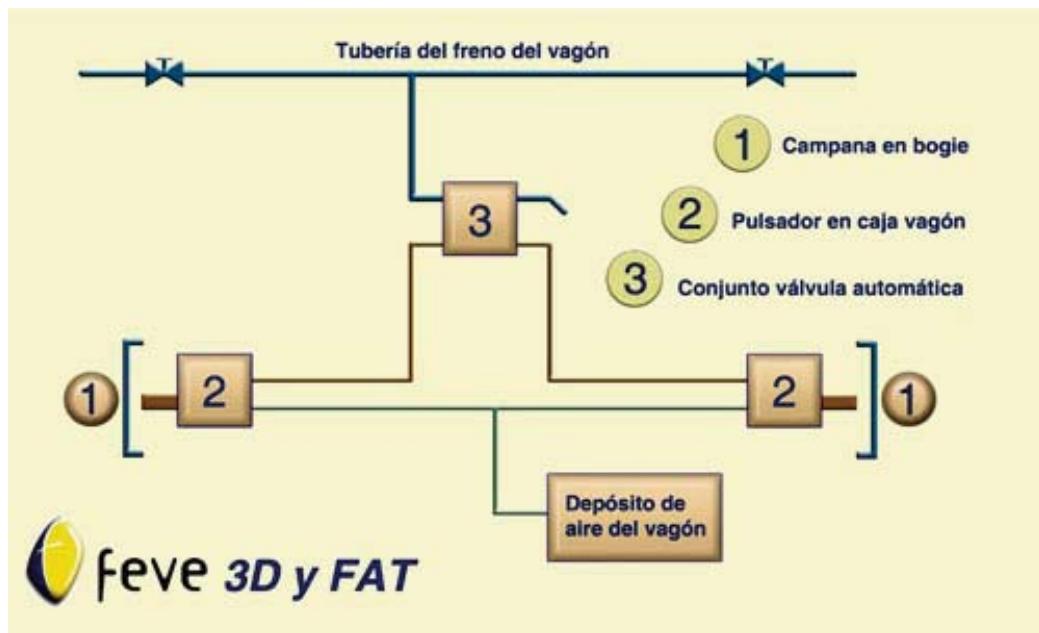


Fig. 3. Diagrama neumático 3DyFAT®

Las características del sistema 3DyFAT® que lo distingue del resto de los demás dispositivos detectores de descarrilamientos son las siguientes:

1. El sistema está basado en principios físicos simples
2. No es un prototipo, es una realidad que hoy opera con alta fiabilidad en más de un millar de vagones.
3. No utiliza conductores eléctricos ni dispositivos electrónicos. No necesita baterías, acumuladores ni otras fuentes análogas de alimentación.
4. Funciona perfectamente con independencia de la velocidad a la que se produce el descarrilamiento
5. Es muy sencillo su montaje, tanto en vagones nuevos como usados.
6. Tiene larga vida útil, similar al vagón donde se instala.
7. Se mantiene estable durante toda su vida útil, sin necesidad de ajustes posteriores a su montaje.
8. Mantenimiento simple que no precisa de ningún engrase, bastando actuar manualmente el pulsador en las revisiones periódicas del vagón, para verificar la eficacia del sistema.
9. Despues de actuar en un descarrilamiento, el sistema se rearma fácilmente y sin utilizar consumibles de ningún género.
10. Requiere una inversión económica muy pequeña. Es un sistema muy económico.



**Fig. 4.** Válvula automática del 3DyFAT®

### **3. Conclusión**

El sistema 3DyFAT® reduce y minimiza las consecuencias de los descarrilamientos de trenes y los daños que producen la infraestructura, el material rodante, en el medioambiente y en el entorno de la línea, suponiendo una mayor contribución a la seguridad del transporte ferroviario.

### **4. Referencias**

<http://www.feve.es>

<http://www.all-rail-systems.com/>



## Nuevas prescripciones de estabilización de suelos con cal para rellenos de terraplén en líneas de alta velocidad de ADIF

### *New prescriptions on lime-stabilized soils for high-speed railways embankments of ADIF*

Francisco Cabrera Jerónimo (Adif); José Javier Navarro Ugena (Adif); José Estaire Gepp (Cedex);  
Maria Santana Ruiz de Arbulo (Cedex) (\*)

#### Resumen

Debido a la limitada disponibilidad de material apto para la construcción de terraplenes para plataforma de alta velocidad, la necesidad de estabilizar *in situ* determinados materiales con cal está viéndose incrementada. Los suelos cohesivos o plásticos, con contenidos apreciables de arcillas y limos, muy frecuentes en toda la geografía española, presentan graves problemas geotécnicos para su empleo en la construcción de infraestructuras debidos a su elevada plasticidad, reducida capacidad de soporte e inestabilidad volumétrica, principalmente en función de la humedad (hinchamiento y colapso). El uso de los materiales que se encuentran directamente en la traza de las propias obras o en los préstamos cercanos es recomendable desde el punto de vista económico y medioambiental. ADIF y CEDEX han redactado conjuntamente unas prescripciones sobre el empleo de la cal para la estabilización de suelos en la construcción de terraplenes de plataforma de alta velocidad..

Palabras clave: Infraestructura, normativa, Adif, terraplenes, cal, estabilización de suelos.

#### Abstract

*Due to the limited availability of earth materials for embankments of high speed lines, the lime-stabilized soils system is becoming interesting. The cohesive or plastic soils, that contain high clay and lime quantity, present grave problems due to their plasticity, low bearing rate and instability (expansion or contraction). The use of the site materials is recommended from the economical and environmental point of view. For this reason, Adif and CEDEX had worked together redacting the new prescriptions on lime-stabilized soils for High Speed Railways core embankments.*

*keywords:* Infrastructure, regulations, Adif, embankments, lime, stabilized soils.

\* fcabrera@adif.es; javier.navarro@adif.es; jose.estaire@cedex.es; Maria.S.Ruiz@cedex.es

## **1. Introducción**

En la construcción de obras lineales (carreteras y líneas ferroviarias) y cualquier otra que requiera grandes explanaciones, es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras y materiales. Debida a la limitada disponibilidad de materiales aptos para la construcción de terraplenes, se hace más necesaria la utilización de todos los materiales que se encuentran directamente en la traza de las propias obras, o en préstamos cercanos, sean cuales sean sus propiedades.

Para estos casos, actualmente existen diversas técnicas de tratamiento y aprovechamiento de los materiales disponibles, para reducir su sensibilidad al agua y disminuir, en mayor o menor grado, su sensibilidad a la deformación bajo las cargas del tráfico. Para esto se suelen utilizar ligantes hidráulicos como la cal, que es el caso que se analiza en este artículo.

La adición de cal al suelo provoca diferentes efectos, visualmente se observa que el aspecto del suelo pasa a ser “más granular” y de forma práctica se obtiene una mezcla de mejor “trabajabilidad”. Estos efectos vienen derivados de las reacciones químicas que tienen lugar al mezclar un suelo arcilloso con la cal y el agua. Las propiedades geotécnicas de la mezcla cambian, se reduce rápidamente la plasticidad del suelo y su hinchamiento frente al agua, y aumenta su capacidad portante.

En general, con los suelos arcillosos el tratamiento con cal es una buena solución, pero es imprescindible realizar un plan de ensayos muy exhaustivo, tal y como viene reflejado en las prescripciones que se han redactado. En algunos casos el tratamiento con cal no llega a ser suficiente y entonces sería preciso realizar otro tipo de tratamientos o importar material de préstamos, con el consecuente aumento del coste de la obra.

## **2. Colaboración ADIF-CEDEX**

ADIF y CEDEX firmaron en 2010 una encomienda de colaboración técnica de naturaleza pública y sometida al ordenamiento jurídico general vigente en la Administración Pública. Dadas las especiales características técnicas de los trabajos que se pretende acometer, la singularidad de los instrumentos requeridos para su ejecución y la alta cualificación e independencia exigibles a la Entidad que los debe llevar a cabo, se consideró oportuno que el CEDEX se encargara de la realización de dichos trabajos a través de una encomienda de gestión.

Una de las líneas de actuación está recogida en el proyecto nº 7 titulado “Actualización de los artículos del Pliego de Prescripciones Tipo (PGP) de rellenos y tratamientos con cal”. Los objetivos iniciales fueron:

- Establecer un protocolo de ensayos a realizar para determinar la aptitud de los materiales a emplear en el núcleo y la coronación de rellenos de las líneas de alta velocidad.
- Establecer un protocolo para el estudio del posible aprovechamiento de materiales inicialmente no válidos (según las vigentes prescripciones de ADIF) mediante la adición de cal.
- Revisión y actualización de las actuales prescripciones que figuran en los artículos del PGP.

### **3. Primeras tareas de revisión bibliográfica y ensayos de laboratorio**

#### **3.1. Revisión bibliográfica**

La primera parte del trabajo ha consistido en la elaboración del estado del arte, mediante la revisión de la normativa vigente en otras Administraciones Públicas relacionadas con el tratamiento de suelo con cal. Entre ellas destacan el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras (PG-3), el Manual de estabilización de suelos con cal de GIASA la Junta de Andalucía y otras normas y recomendaciones de la Junta de Castilla y León, Reino Unido, Francia y la asociación nacional de fabricantes de cal (ANCADE).

El análisis de estos pliegos y normativas ha permitido tener una visión global de la metodología empleada en el estudio del tratamiento de suelos con cal.

Gracias a esta revisión, se ha modificado la estructura del pliego de ADIF, se han ajustado algunos valores de los ensayos a obtener en el laboratorio y se han introducido o sugerido nuevos ensayos.

#### **3.2. Selección de tramos de ensayo**

La nueva redacción del pliego de suelos tratados con cal se ha fundamentado tanto en la revisión bibliográfica como en los ensayos de laboratorio y los ensayos in situ.

Actualmente, Adif está desarrollando numerosos de proyectos y obras de construcción de nuevas líneas de alta velocidad. Las necesidades de cada trazado son muy particulares, pero el análisis de la problemática debido a la falta de materiales adecuados para la construcción de terraplenes muestra que el empleo de la cal para la mejora de las características geotécnicas es viable en varios tramos.

Tras un primer análisis de los tramos en los que es posible el uso de suelos tratados con cal, debido a diversos factores, como el estado en el que se encontraba la obra, el volumen de material deficitario y las características geotécnicas del suelo a tratar, se decidió centrar el estudio en varios tramos:

- LAV Antequera – Granada, tramo Tocón – Valderrubio: Desmonte de Íllora; el avanzado estado de las obras permitía la elaboración de un estudio específico de laboratorio y de su ejecución en obra. En la siguiente fotografía se observa un terraplén tratado con cal terminado en este tramo.



**Imagen 1:** Aspecto de un terraplén tratado con cal en el tramo Tocón – Valderrubio en marzo de 2010.

- LAV Antequera – Granada, tramo Tocón – Valderrubio: Peña de los Enamorados; el terreno a tratar presenta singularidades geotécnicas que permite estudiar el comportamiento de suelos problemáticos con la cal. En la siguiente fotografía se observa el aspecto de las arcillas altamente expansivas presentes en el tramo de Peña de los Enamorados y que han sido estudiadas para ser tratadas con cal.



**Imagen 2:** Aspecto de las arcillas presentes en el tramo de Peña de los Enamorados (Archidona).

- LAV Palencia – León: tramo Becerril de Campos – Río Cea; las características hidrogeológicas y geotécnicas de los materiales permiten comprobar el resultado de los suelos tratados con cal. En la siguiente fotografía se observa un terraplén realizado con las facies Tierra de Campos y que se ha estabilizado con cal.



**Imagen 3:** Aspecto de un terraplén terminado en el tramo Palencia – León (Tierra de Campos).

Como se ha comentado con anterioridad, la elección de estos tramos ha permitido elaborar una metodología de trabajo en el laboratorio con materiales de muy diferentes características geotécnicas, y estudiar la puesta en obra del tratamiento con la cal. Además, tras la ejecución de los terraplenes se han extraído muestras para su análisis que han permitido determinar el estudio necesario para el control de calidad.

## 4. Modificaciones del pliego de suelos tratados con cal

### 4.1. Esquema del nuevo articulado

Las nuevas prescripciones de suelos tratados con cal se han redactado siguiendo el siguiente esquema de trabajo:

- Evaluación de la aptitud del suelo al tratamiento con cal.
- Estudio de la mezcla en el laboratorio y obtención de la dosificación óptima de cal.
- Ejecución de tramos de prueba y verificación.
- Ejecución del terraplén:

Preparación de la superficie existente.

Disgregación del suelo.

Humectación o desecación del suelo, según corresponda.

Distribución de la cal.

Ejecución de la mezcla de la cal con el suelo.

Curado inicial, si es necesario.

Compactación.

Acabado de la superficie y tratamiento de las juntas de compactación.

Curado final y protección superficial

- Control de calidad

Merece la pena destacar que se ha considerado el tratamiento con cal un método para el tratamiento de suelos para su uso en terraplenes y fondos de desmonte, pero también para el secado de suelos con excesiva humedad.

### 4.2. Evaluación de la aptitud de un suelo a ser tratado con cal

Los suelos a tratar con cal para los usos mencionados anteriormente deben cumplir las condiciones, indicadas en la Tabla I, referentes al número mínimo de muestras a ensayar y a los valores de referencia y extremo que se deben obtener en los ensayos realizados.

**Tabla I:** ensayos a realizar en el estudio previo de idoneidad del suelo y valores a obtener

Parámetro	Número mínimo de muestras	Valor de referencia	Valor extremo	% ensayos comprendidos entre valor de referencia y extremo
Tamaño máximo	8	$T_{max} \leq 80 \text{ mm}$	$T_{max} \leq 100 \text{ mm}$	< 10%
Contenido en finos	8	$\text{Finos} \geq 15 \%$	$\text{Finos} \geq 10\%$	< 15%
Índice de plasticidad	8	$10 \leq IP \leq 40$	$5 \leq IP < 10$ $40 < IP \leq 45$	< 10%
Contenido en materia orgánica	8	$MO \leq 2\%$	$MO \leq 3\%$	< 15%
Contenido en sulfatos solubles	8	$SO_3 \leq 0,8\%$	$SO_3 \leq 1\%$	< 10%

**Nota:** Valor extremo: valor que no puede ser excedido por ningún ensayo

Es importante resaltar lo novedoso de la inclusión de este tipo de tablas en unas prescripciones técnicas. Esto tiene por objeto facilitar la comprensión del texto y, sobre todo, el cumplimiento de los valores de los ensayos, ya que permite una cierta y comprensible holgura en el caso de que alguna de las muestras resulte fuera de rango.

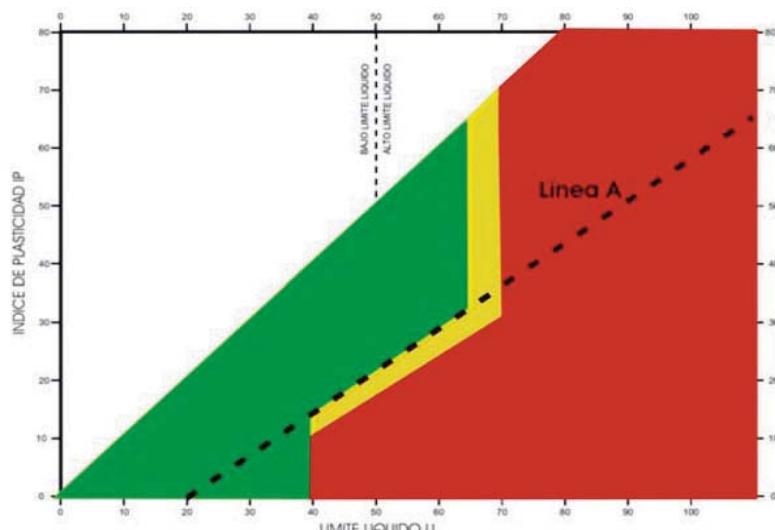
#### 4.3. Estudio de la mezcla del suelo con la cal en el laboratorio

Es de obligado cumplimiento realizar una campaña de ensayos de laboratorio para establecer la dosificación mínima de cal para cada tipo de suelo. La mezcla del suelo con la cal deberá cumplir las condiciones, indicadas en la Tabla II, referentes al número mínimo de muestras a ensayar y a los valores de referencia y extremo que se pueden obtener en los ensayos indicados.

**Tabla II:** ensayos a realizar en el estudio previo y valores a obtener en las mezclas suelo-cal

Parámetro	Número mínimo de ensayos	Valor de referencia	Valor extremo	% ensayos comprendidos entre valor de referencia y extremo
Límites de plasticidad	8	Zona verde del gráfico de Figura 1	Zona amarilla del gráfico de Figura 1	< 15 %
Proctor Modificado	8	---	---	---
Índice CBR (para núcleo)	8	$CBR \geq 6$	$CBR \geq 5$	< 15 %
Índice CBR (para coronación, espaldones y fondo de desmonte)	8	$CBR \geq 12$	$CBR \geq 10$	< 15 %
Colapso de suelos	8	Colapso $\leq 1\%$	Colapso $\leq 1,5\%$	< 15 %
Hinchamiento libre	8	$H_{libre} \leq 1\%$	$H_{libre} \leq 1,5\%$	< 15 %
Curva contenido de cal-pH	8	---	---	---

**Nota:** Valor extremo: valor que no puede ser excedido por ningún ensayo



**Imagen 4:** Gráfico de Casagrande con indicación de los valores límite y extremo

Un aspecto importante en los ensayos de laboratorio es la preparación de las probetas de la mezcla de suelo con cal a ensayar ya que influyen de manera significativa en el resultado de los ensayos. En la nueva redacción del pliego se incluye, de forma precisa, la metodología de preparación de las muestras para cada tipo de ensayo. Ello garantiza la correcta representatividad del tratamiento en el laboratorio.

#### **4.4. Tramos de prueba y tramo de verificación**

Se trata de otro aspecto innovador de este artículo de Pliego, ya que incluye la posibilidad de realizar varios tramos de prueba y la obligatoriedad de ejecutar un tramo de verificación antes del comienzo de los trabajos definitivos del tratamiento del suelo con la cal.

- Las dimensiones mínimas de este tramo de verificación y las razones por las que se han establecido se recogen a continuación:
  - 100 m de longitud: de esta manera la maquinaria es capaz de alcanzar sin problemas la velocidad de trabajo, en condiciones normales.
  - 2,5 veces la anchura de la máquina de compactación: de esta manera se consiguen zonas con y sin solapes lo que permite obtener más información.
  - Altura correspondiente a tres tongadas: los ensayos se deberían centrar en la tercera tongada, no teniendo en cuenta las dos primeras tongadas por su cercanía al cimiento y no ser representativas de la mayoría de las tongadas.
  - Dadas las dimensiones exigidas al tramo de verificación se ha considerado conveniente incluir la posibilidad de que, con la previa autorización de la Dirección de Obras, este tramo pueda realizarse en la traza y, si supera todos los controles, pueda ser abonado como terraplén definitivo.

#### **4.5. Proceso de ejecución**

En el artículo se describen las prescripciones para la ejecución de esta unidad de obra, entre la que destaca la distribución de la cal. La cal viva o apagada se distribuirá uniformemente mediante equipos mecánicos con la dosificación fijada de dos formas posibles:

- Por vía seca, en forma de polvo o granel, mediante una extensión previa sobre la superficie de trabajo, anterior al mezclado con el suelo.
- Por vía húmeda, en forma de lechada de cal hidratada o apagada, elaborada previamente también por equipos mecánicos. La proporción de cal en la lechada será como máximo del 35%.

En cualquier caso, siempre es necesaria la dosificación de cal mediante dosificador volumétrico servodirigido como el que se muestra en la siguiente imagen.



**Imagen 4:** Mezcla de la cal mediante dosificador servodirigido en el tramo de Venta de Baños (Palencia)

#### **4.6. Control de calidad**

Con el objetivo de garantizar la correcta ejecución del tratamiento del suelo con la cal, en el pliego se definen los ensayos a realizar en el control de calidad de la mezcla fabricada. Se han definido dos tipos de lotes:

- Lote tipo 1: constituido por 5.000 m<sup>3</sup> de terreno tratado, para cada tipo de suelo, o la cantidad tratada en un día, si ésta es menor que 5.000 m<sup>3</sup>.
- Lote tipo 2: constituido por 10.000 m<sup>3</sup> de terreno tratado, para cada tipo de suelo, o la cantidad tratada en una semana, si ésta es menor que 10.000 m<sup>3</sup>.

Adicionalmente se realiza un control de la mezcla del suelo con la cal, una vez compactada, y que también se hará por lotes. Este último control correspondería al denominado “lote tipo 3” que está constituido por 5.000 m<sup>2</sup> de terreno tratado, para cada tipo de suelo, o a la superficie tratada en un día, si ésta es menor que 5.000 m<sup>2</sup>.

#### **5. Conclusiones**

El presente artículo expone, de forma resumida, las nuevas prescripciones del Pliego de Prescripciones Tipo para proyectos de plataforma de alta velocidad de Adif (PGP) relacionadas con el tratamiento de suelos con cal. En él se incluyen algunos aspectos novedosos pero, sobre todo, se establece un protocolo de ensayos para el diseño, construcción y control de calidad de los terraplenes y fondos de desmonte en los que haya sido necesario estabilizar con cal.

La elaboración de este pliego queda ahora abierta a la puesta en práctica de este procedimiento en algunos tramos de construcción de plataforma para conocer realmente su aplicabilidad y eficacia, aunque el número de ensayos a realizar y la inclusión de la obligatoriedad de realizar un tramo de verificación asegurarán una buena ejecución de la obra.

## **6.- Agradecimientos**

Este trabajo no hubiera sido posible sin la aportación de los miembros de Adif y colaboradores a lo largo de los dos años que duró el proyecto:

Luis Serrano Martín, Mario Robles López, Aitor Fajardo Ballesteros, Raimundo Angosto Pérez, Juan José Encinas Nuevo, Eusebio Nestares, Jesús Miguel Ortega, José Luis Torres-Baptista Cañada, Rodrigo Sánchez Solans, Miguel Rodríguez Plaza, Adelardo Martín de la Vega y Muñoz de Morales, Luis Quero Ruiz, Juan Carlos Monge, Luis Sopeña Mañas (consultor independiente y profesor de la UPM), Ángel Sampedro (consultor independiente y profesor de la UAX).





FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

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

VÍA LIBRE TÉCNICA  
INVESTIGACIÓN FERROVIARIA

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

## Influencia del trazado en la calidad geométrica de vías férreas

### *The influence of track design parameters on track geometric quality*

Fernanda Viana Rodrigues<sup>a</sup>, Adelino Ferreira<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ingeniera Civil, Miembro Sénior del Colegio de Ingenieros y Miembro Especialista en Transportes y Vías de Comunicación, Rede Ferroviaria Nacional, REFER E.P.E

<sup>b</sup> Ingeniero Civil, Miembro Sénior del Colegio de Ingenieros y Miembro Especialista en Transportes y Vías de Comunicación, Profesor, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Coimbra

#### Resumen

En el estudio de un trazado es obligatorio que sus parámetros establezcan un buen compromiso entre los parámetros relacionados con seguridad, confort y economía del sistema vehículo-vía. El conocimiento de las solicitudes resultantes de la interacción inherente al conjunto vehículo y vía es importante ya que el vehículo está sujeto a diversos movimientos cuando realiza su marcha. Estos son determinados por los movimientos del propio vehículo, por la secuencia de los elementos del trazado y por los defectos de la vía. Este artículo presenta el resultado del análisis de algunos aspectos conceptuales del trazado, en particular de las características de los elementos geométricos y su estructura secuencial y en qué medida potencian la aparición de defectos en la geometría de la vía. Hay que señalar también la importancia de compatibilizar los valores admitidos en el proyecto con la estabilidad de la geometría de la vía, en función de su estructura y manutención.

Palabras clave: vía, calidad geométrica, mantenimiento, defecto, peralte, pendiente, trazado

#### Abstract

*In the study of track design parameters it is mandatory that parameterization establishes a good compromise between the safety, comfort and economic parameters of the vehicle-track system. The knowledge of the requests that result from the interaction of the rolling stock and track set is important since the vehicle is subject to several parasitic movements when in motion. These are determined by the movements of the vehicle itself, the track and the track geometry defects. This article presents the results of analysis of some conceptual aspects of track design parameters, including the characteristics of geometric elements, their sequential structure and their effect on the appearance of defects in track geometry. We also underline the importance of harmonizing the values used in design parameters with the stability of the track geometry, depending on its structure and maintenance..*

*keywords:* track, geometric quality, maintenance, track displacement, cant, gradient, track design parameters

\* [fernanda.viana.rodrigues@gmail.com](mailto:fernanda.viana.rodrigues@gmail.com) / [adelino@dec.uc.pt](mailto:adelino@dec.uc.pt)

## 1. Introducción

La calidad geométrica de la vía tiene un papel fundamental en la seguridad, en el confort y en la fiabilidad de las infraestructuras ferroviarias y, consecuentemente, en la determinación de las acciones de manutención. Estas requieren dispendiosos recursos financieros, por lo que se torna esencial estudiar con rigor la evolución de las características de la vía durante el período de vida útil del sistema. Si, desde el punto de vista económico, el elevado coste de las acciones de mantenimiento necesarias para la corrección de los defectos de la vía es importante, no menos importante es garantizar, antes, que el trazado es proyectado y materializado eliminando o, si eso no es posible, minorando al máximo, las disposiciones que puedan originar defectos en la geometría de la vía que, de forma sistemática, provoquen no solo deformaciones prematuras en la vía, pero también la necesidad de, recurrentemente, intervenir en esas zonas.

Cuando se proyecta, a pesar del respeto por los documentos normativos, se convive con una situación más o menos ideal. En la situación real deparamos con una conyugación de efectos que no es posible evaluar en proyecto frente a la cantidad de variables a considerar en la interacción entre el vehículo y la vía, gran parte de ellas aleatorias. El estudio de un trazado precisa obtener características geométricas y dinámicas de sus elementos constituyentes que proporcionen una buena dinámica de rodamiento para las circulaciones, su estabilidad y la minimización de las acciones de mantenimiento de la vía. Para eso, es necesario compatibilizar la geometría de la vía en planta y alzado, requiriendo el conocimiento de las solicitudes resultantes de la interacción inherente al conjunto vehículo y vía-férrea, en función de sus especificidades. El proyecto no puede descuidar las disposiciones que originen incrementos en las desviaciones de los parámetros de la vía proyectada, a lo largo de su ciclo de vida, que potencien la reducción de seguridad y confort, por lo que importa evaluar las repercusiones inducidas por la concepción del trazado y estructura de la vía en las desviaciones de los parámetros que definen su geometría.

## 2. Relación entre los parámetros de proyecto y los defectos de la vía

El análisis de los diferentes criterios de seguridad, confort y fatiga introduce una serie de relaciones entre los parámetros de dimensionamiento del trazado de la vía (Molinari, 1999), las características de los vehículos y las tolerancias admisibles para los defectos de la vía. El proyecto de un trazado de vía se basa fundamentalmente en la verificación de que no sean sobrepasados determinados valores de los parámetros, como el peralte y la insuficiencia de peralte, y sus variaciones en el espacio o en el tiempo (IPQ, 2007). Estas verificaciones son efectuadas para condiciones ideales de circulación: geometría sin defectos y velocidad constante, lo que torna la correlación entre las características de la vía proyectada y los defectos correspondientes a una condición a armonizar. Los valores límite establecidos en el proyecto determinan las condiciones de confort y suministran indicaciones en cuanto a la seguridad, ya que los esfuerzos sobre la vía son también proporcionales a la aceleración sin compensar (Maynar, 2008).

Sin embargo, en la situación real, ocurren desviaciones de la geometría proyectada que permiten identificar los parámetros del proyecto que tendrán que ser limitados, debido al incremento de esfuerzos que se originan en la vía. Para el análisis de las diferencias se recurre a los registros de la geometría de la vía, obtenidos a través de mediciones efectuadas por vehículos de inspección y que sirven para determinar la calidad geométrica de la vía. En términos de la calidad geométrica, los parámetros que caracterizan la geometría de una vía ferroviaria son: el ancho de vía; alineación; la nivelación longitudinal; la nivelación transversal; y el alabeo. La presencia de defectos en cualquiera de estos parámetros interfiere con los movimientos de los vehículos. Esencialmente, los defectos de nivelación longitudinal, afectan al movimiento de galope, mientras los defectos de nivelación transversal son la causa del movimiento de

balanceo de los vehículos. Las irregularidades existentes en el ancho de la vía y alineación inciden en el movimiento de lazo, aumentando las aceleraciones laterales. A su vez, los defectos de alabeo pueden originar el descarrilamiento de los vehículos (Lupiáñez, 2010). El control periódico de la geometría de la vía efectuado por los vehículos de inspección permite evaluar si las desviaciones de cada parámetro de la vía se mantienen dentro de las tolerancias admisibles (REFER, 2009a). También, si se comparan con los parámetros proyectados, es posible evaluar la evolución de las diferencias en cada segmento y en las diferentes secuencias de segmentos que la componen. Eso permite evaluar algunos aspectos conceptuales del trazado, nombradamente las características intrínsecas de los elementos geométricos y la estructura secuencial de las alineaciones rectas y circulares, así como las respectivas extensiones y, consecuentemente, evidenciar/tipificar ciertos patrones de comportamiento de la estructura de una vía y optimizar la relación entre los parámetros proyectados.

Existen, entre la vía y el vehículo, interacciones muy estrechas debido a los esfuerzos ejercidos por el vehículo en la vía, por lo que las imperfecciones de la vía influyen sobre la estabilidad del vehículo con consecuencias importantes en el confort de los pasajeros y en la seguridad de las circulaciones, por lo que es necesario conservar una buena calidad de la vía.

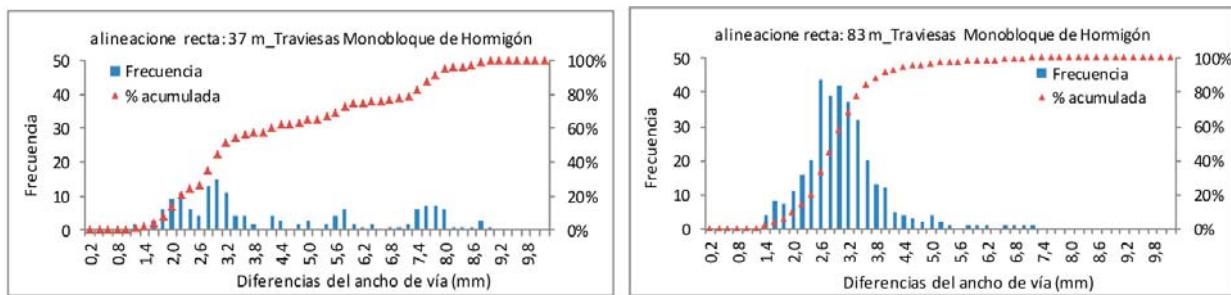
### **3. Análisis de la calidad de la geometría de la vía**

Los segmentos analizados son parte de un trozo de vía con servicio mayoritariamente suburbano, donde la velocidad máxima de proyecto es de 100 km/h, los radios están comprendidos entre 196 y 25000 m y el ancho nominal de vía es de 1668 mm. La mayor parte del trazado tiene características no homogéneas, lo que permite evaluar las consecuencias de frecuentes alteraciones del trazado: en términos de alineaciones rectas, curvas de transición y alineaciones circulares, así como las respectivas extensiones. En la situación analizada es relevante apreciar los factores relacionados con la inscripción de los vehículos en curva y la resistencia al avance conferida por las pendientes, que contribuyen para dictar los niveles de seguridad, tales como los sobreanchos y las vías conjuntas de los carriles. Los resultados presentados se centran sobretodo en el parámetro ancho nominal de vía por la evidente relación con los desgastes en los carriles y en las ruedas. El análisis es efectuado para las mismas condiciones de velocidad, armamento de la vía (traviesas de hormigón y sujeteciones elásticas) y tipo de vehículo.

#### **3.1. Distancia que hay que asegurar entre ligaciones adyacentes**

La perturbación originada por la entrada o salida de vehículos en los segmentos de un trazado no es amortizada inmediatamente, de tal modo que sus efectos son susceptibles de sobreponerse si el desarrollo de los elementos geométricos no es suficiente para estabilizar el movimiento del vehículo.

En el caso de alineaciones rectas con diferentes extensiones, localizados entre dos curvas con características idénticas (curvas de transición, radios y peralte), se verifican mayores diferencias entre el ancho teórico y el ancho real de la vía en las alineaciones de menor extensión. El ejemplo de la Figura 1 compara el comportamiento de las diferencias en dos alineaciones rectas. En la alineación recta de menor extensión se observa una dispersión de los valores de las diferencias entre 1,2 y 9,0 mm y una mayor frecuencia centrada en los 3,0 mm. En la alineación recta más extensa la concentración de las diferencias se sitúa entre 1,6 y 5,0 mm y la mayor frecuencia está centrada en los 2,6 mm. Para un mismo valor de diferencia (5,0 mm) el porcentaje acumulado en el primer caso es de 66% y en el segundo de 97%, lo que significa que en la alineación recta más extensa solamente un porcentaje residual se encuentra por encima de 5,0 mm.

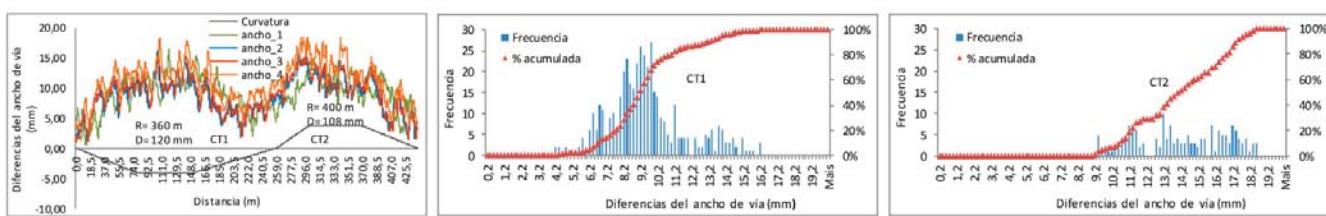


**Figura 1:** Diferencias del ancho de vía en alineaciones rectas con extensiones diferentes

A una menor extensión de alineaciones rectas está asociada una mayor perturbación en las desviaciones de los parámetros de la geometría de la vía, con mayor o menor impacto en su comportamiento conforme los parámetros de las curvas adyacentes, en lo que se refiere al valor del radio, a la pendiente del diagrama de peralte y a la longitud de las curvas de transición. En las alineaciones circulares se verifica un comportamiento idéntico.

El proyecto, sobretodo en trazado sinuoso, exige particular atención en el dimensionamiento de las extensiones de los segmentos (Esveld, 2001) que deberán garantizar, como mínimo, un valor de 40 m, a que acrece la ponderación sobre las características del trazado, arriba y abajo del segmento, y sobre el material rodante que hace la exploración de la línea, que podrá incrementar el valor mínimo de las extensiones de los segmentos.

Curvas adyacentes de sentidos contrarios con punto de inflexión deben ser conectadas con una única transición. Cuando eso no ocurre, hay alteraciones de la geometría de la vía que llevan a la formación sistemática de desviaciones de los parámetros que tienden a alterar la geometría de vía proyectada tanto más significativamente cuanto más reducidos fueren los radios, cuanto más elevadas fueren los peraltes y cuanto menor sea la extensión de los segmentos. Como ejemplo, se puede ver en la Figura 2, en la curva de transición (CT1) con mayor extensión y menor pendiente del diagrama de peralte, las diferencias del ancho de vía varían entre 4,2 y 16,2 mm, mientras en la (CT2) varían entre 9,2 y 18,6 mm. La concentración de las diferencias en el primer caso ocurre entre 8,0 y 10,2 mm. En la CT2 se verifica una dispersión de los desvíos mucho más significativa.



**Figura 2:** Diferencias del ancho de vía en curvas de sentido contrario con punto de inflexión

Los defectos de alabeo, principales responsables por la ocurrencia de los descarrilamientos, se centran en estas zonas, por lo que su dimensionamiento requiere el conocimiento de los esfuerzos que se desarrollan en la interacción rueda-carril (Aliás, 1984).

### 3.2. Zonas de inserción de desvíos

Por sí solas, las zonas de inserción de los desvíos, debido a la discontinuidad geométrica, a la rigidez y a la mayor dificultad en la conservación de la nivelación, son generalmente responsables por distorsión es en la alineación de la vía que se extienden arriba y debajo de los puntos de inserción. Los efectos generados por las condiciones de inserción (elementos adyacentes) de los aparatos de vía pueden incrementar la instabilidad inherente al pasaje de las circulaciones en este equipamiento. Cuando los aparatos de vía son instalados en alineaciones rectas o en alineaciones circulares con una extensión que no permite la estabilización del vehículo, se verifica un aumento de la amplitud de los defectos en los elementos geométricos colaterales. El mismo se pasa cuando sus puntos notables, las juntas de las contra agujas y las juntas finales del desvío, están localizados en la proximidad del inicio o del fin de las curvas de transición. Estas situaciones determinadas por razones diversas, nombradamente la necesidad de ampliación de las estaciones, conyugada con las condiciones orográficas y territoriales, comprueba las zonas de los desvíos como puntos críticos del trazado.

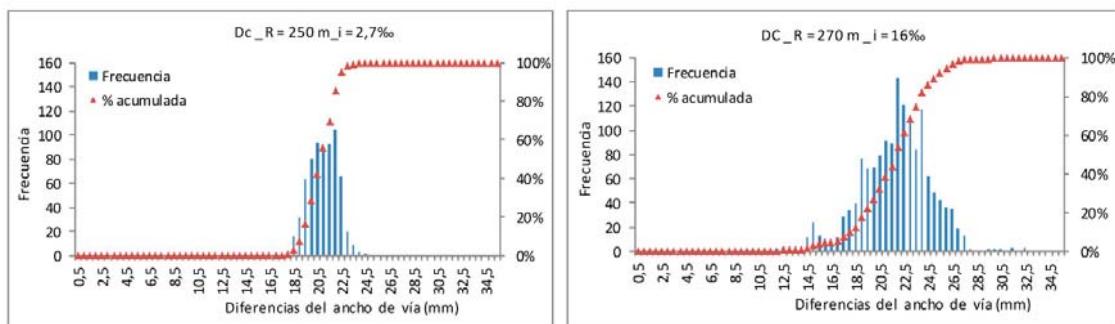
### 3.3. Pendientes elevadas conjugadas con curvas en planta de pequeño radio

La conjugación del trazado en alzado con el trazado en planta presenta un papel tanto más significativo cuanto más elevadas fueren las pendientes y menores fueren los valores de los radios en planta, debido a la resistencia al avance que estos ofrecen al movimiento de los vehículos. Las curvas de radios más reducidos originan una resistencia al movimiento que depende, esencialmente, del espacio entre las pestañas de las ruedas y las caras laterales de la cabeza del carril y del deslizamiento de las ruedas sobre los carriles. Esta resistencia depende de las características del vehículo ferroviario y de sus condiciones de inscripción en curva y naturalmente del radio de la curva. La resistencia al movimiento debido a las curvas y a la inclinación de las pendientes es dada por la Ecuación (1) que establece la noción de perfil de compensación, de gran interés no solo en la resolución de problemas de tracción sino también en el estudio de los propios trazados (Gonçalves, 1974).

$$i_c = i + \frac{K}{R} \quad (1)$$

Donde:  $K$  es una constante que depende del coeficiente de atrito entre el carril y el aro de la rueda, del embasamiento de los vehículos, del ancho de vía y del sobreancho de la vía;  $i$  inclinación de las pendientes,  $R$  radio de la curva.

Cuando las pendientes con inclinaciones elevadas se sobreponen con curvas en planta de radio reducido (inferior a 300 m para el ancho de vía 1668 mm) los defectos del ancho de vía son superiores a los verificados en superposiciones de curvas con valor de radio del mismo orden de grandeza con pendientes de inclinaciones más suaves. Con efecto, exemplificando, la Figura 3 evidencia la tendencia de las diferencias del ancho de vía para los segmentos correspondientes de las alineaciones circulares de las curvas de radios 250 y 270 m, con inclinaciones de 2,7% y 16,0%, respectivamente.



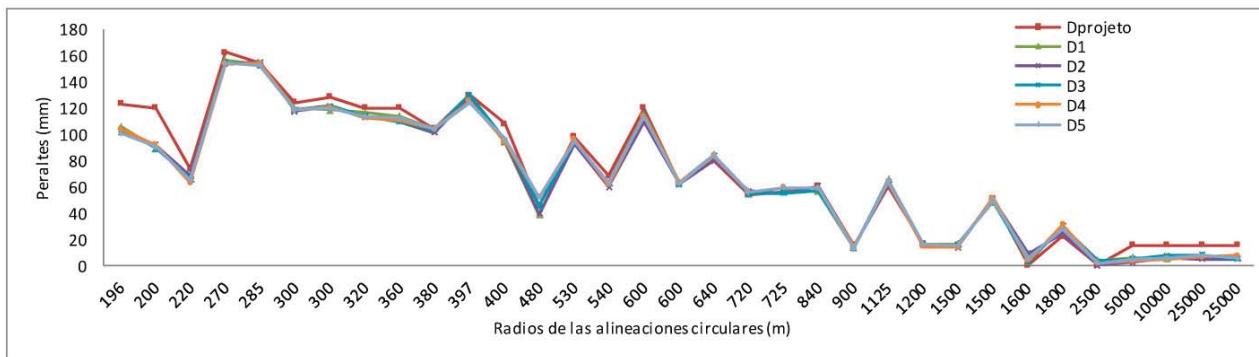
**Figura 3:** Diferencias del ancho de vía en curvas con radios idénticos e inclinaciones distintas

El valor de la inclinación de las pendientes conjugado con curvas de radio reducido se presenta como un factor determinante en el valor de los defectos del ancho de vía, una vez que cuanto más acentuada sea la inclinación mayores serán los efectos en los defectos del ancho de vía. Se debe, por eso, eliminar las situaciones de superposición de pendientes de inclinación elevada con curvas de pequeño radio. Estos casos presentan aún mayor relevancia en las zonas correspondientes a las estaciones una vez que las condiciones de frenado y arranque agravan estos efectos.

### 3.4. Peraltes

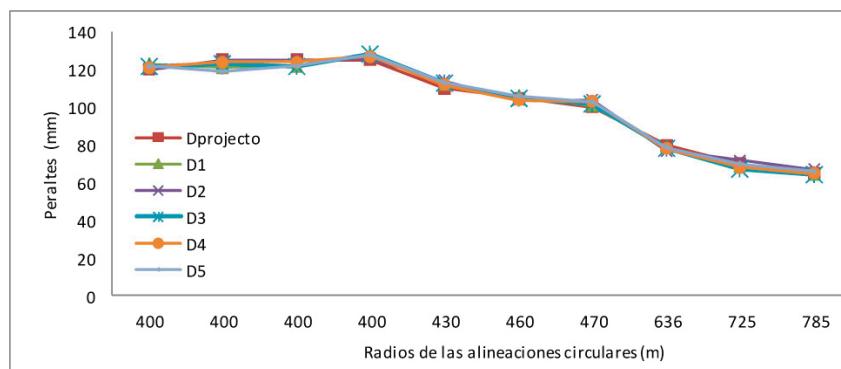
La conservación del peralte proyectado está directamente ligada a las características geométricas del trazado y de la estructura de la vía. La disposición de los elementos geométricos y respectivas extensiones dicta el comportamiento de la estructura de la vía que, en determinadas gamas de radios, reflejan su dinámica propia, mientras en otras gamas existe una tendencia para generar incrementos en los defectos de los peraltes. La Figura 4 traduce, en un trazado no homogéneo, los defectos de escala en alineaciones circulares de radios comprendidos entre 196 y 25000 m, ordenados por orden creciente. La Figura 5 representa las desviaciones en alineaciones circulares de radios comprendidos entre 400 y 785 m, que designaremos por trazado homogéneo.

Como se puede constatar por el análisis de la Figura 4, la dificultad en mantener el valor de los peraltes proyectados es tanto mayor cuanto menor sea el radio, agravándose cuando la curva es dotada de una escala con valor elevado y menores sean los segmentos constitutivos del trazado (alineaciones circulares y transiciones). Los radios inferiores a 200 m (ancho de vía 1668 mm) ofrecen defectos de escala más elevados debido al tipo de vía (con juntas) que equipan esos segmentos. En el caso de los radios superiores a 300 m, las desviaciones del valor del peralte no son muy significativas, con la excepción de los casos en que los desarrollos de las alineaciones circulares son de corta extensión. En este caso, existe una reducción significativa de los puntos de peralte constante que alteran significativamente la geometría proyectada. Para curvas con radios elevados (2500 m) y peraltes bajos, (los peraltes reales son inferiores a los valores proyectados, pudiendo significar dificultad de materialización y/o conservación dado que estas situaciones se verifican en alineaciones circulares de corta extensión.



**Figura 4:** Diferencias de peralte en alineaciones circulares de un trazado no homogéneo

En contrapunto, la Figura 5 refleja las desviaciones de peralte en una vía con trazado homogéneo, para las mismas condiciones de exploración del tramo anterior y en que las curvas presentan radios superiores a 400 m. En este caso son casi inexistentes las desviaciones entre los valores de peralte proyectados y los registrados por los medios de inspección. Las diferencias residuales verificadas son atribuidas a segmentos (alineaciones circulares y transiciones) con extensión insuficiente para estabilizar el vehículo ferroviario.



**Figura 5:** Diferencias de peralte en alineaciones circulares de un trazado homogéneo

### 3.5. Sobreanchos

Se recurre a la aplicación del sobreancho en las curvas de pequeño radio para permitir una mejor inscripción de los vehículos. Con todo, se debe limitar ese sobreancho al menor valor posible, reduciendo al mínimo el ángulo de ataque entre la rueda y el carril, propiciando más suavidad en el rodamiento en tramos de elevada curvatura, disminuyendo la resistencia al avance y, consecuentemente, los desgastes en las ruedas y en los carriles. El problema del sobreancho está ligado a un campo complejo de la inscripción de vehículos en curva y para su resolución contribuyen las características de los vehículos, el radio de la curva y las tolerancias admitidas para las ruedas y para los carriles. Comparando el valor de los defectos del ancho de vía para la gama de valores de los radios de e inferiores con los correspondientes a la gama de valores se verifica una diferencia expresiva, mismo teniendo presente la diferencia de 5 mm entre los sobreanchos aplicados en cada gama de radios (REFER, 2008). El caso que se evidencia en la Figura 6

corresponde a las curvas de radios 220 y 250 m, que pertenecen a gamas de radios diferentes y, consecuentemente, valores de sobreancho distintos. En la curva con radio de 220 m y sobreancho 10 mm, el desvío de 22,5 mm corresponde a un porcentaje acumulado de 6%. En la curva de rayo 250 m y sobreancho 5 mm, el valor del desvío de 22,5 mm presenta un porcentaje acumulado de 95%. El desequilibrio de las diferencias verificadas en las situaciones en que fueran aplicadas sobreanchos de 10 mm, indica que para el vehículo que hace la exploración del tramo analizado el valor del sobreancho puede ser excesivo.

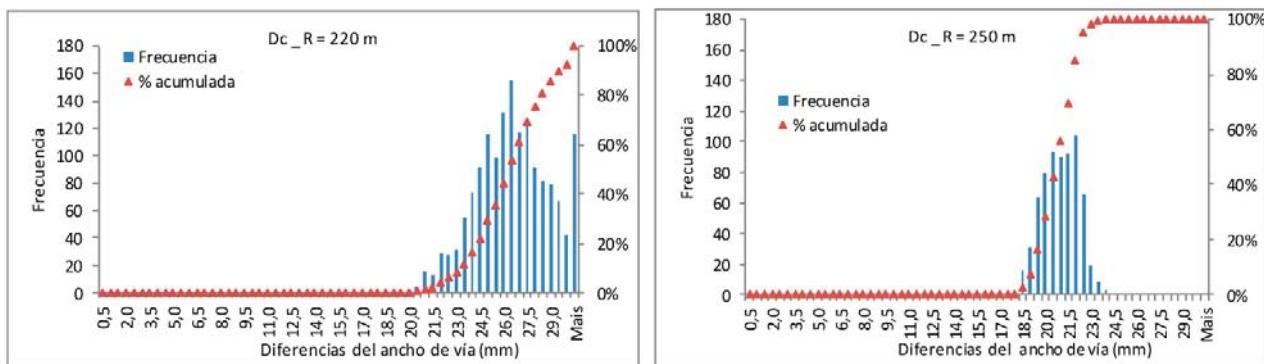


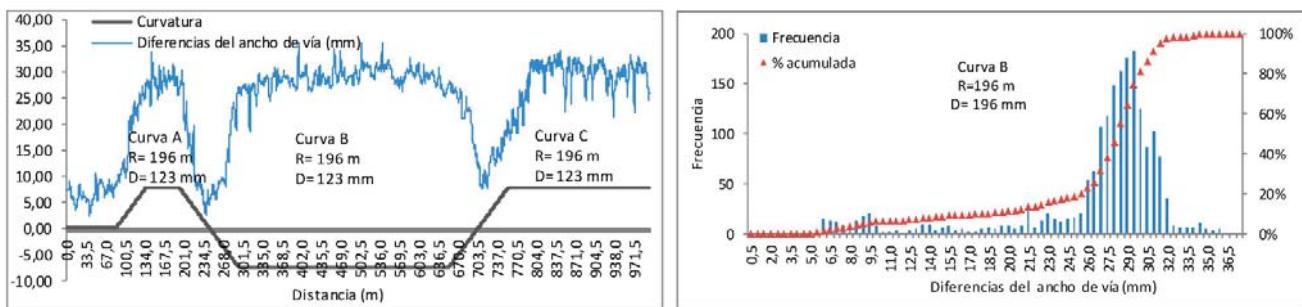
Figura 6: Diferencias del ancho de vía en curvas con radios 220 y 250 m

Estas situaciones hacen que el desgaste lateral se presente ya pronunciado, aunque el ángulo de desgaste en bisel sea lo que evoluciona de forma más acentuada, situación esperada frente a las condiciones de inscripción, con un contacto casi permanente entre la pestaña de la rueda y el carril (REFER, 2009c). Las líneas con estas características se presentan como potenciales para una precoz intervención de sustitución de carriles. La aplicación del sobreancho tiene como finalidad facilitar la inscripción de los vehículos, por lo que se deberá tener en cuenta el trazado (planta y alzado), el ancho de vía, el tipo de traviesas y de sujetaciones, las características del material rodante (embasamiento, diámetro de las ruedas) y el régimen de exploración.

### 3.6. Vía con juntas de los carriles

Las juntas de los carriles son puntos de concentración de rigidez transversal de la vía y de mayor dificultad en la conservación de la nivelación (REFER, 2009b). Se verifica, a través del análisis de los registros de las diferencias del ancho de vía, una amplitud de defectos bastante superior a otras zonas con barra larga. La Figura 7 presenta los registros de las desviaciones del ancho de vía nominal en un trecho de vía con juntas. Los registros del ancho de vía presentan una configuración en “diente de sierra” evidenciando la amplitud de sus valores. La mayor concentración de los defectos del ancho de vía ocurre entre los 26,0 y 30,0 mm y la mayor frecuencia corresponde a los 29,5 mm.

Se constata que las fluctuaciones de los valores de los defectos crecen, en el caso de la vía con juntas, originando picos en la variación de insuficiencia de peralte en el tiempo que pueden atingir valores superiores al límite de la comodidad. Las juntas de los carriles provocan defectos geométricos considerables que influencian la calidad geométrica de la vía en todos sus parámetros.



**Figura 7:** Registro de las diferencias del ancho de vía en una vía con juntas

En este tipo de vía con juntas, la amplitud de defectos es más significativa, por lo que deberá ser más exigente la vigilancia que hay que efectuar a lo largo del período de vida útil del sistema. La vía se degrada con mayor facilidad, obligando naturalmente a un mayor coste de manutención, lo que deberá ser una solución a evitar.

#### 4. Consideraciones finales

La secuencia de los elementos geométricos que constituyen el trazado (alineaciones rectas, alineaciones circulares y transiciones) y la extensión de los mismos, determinan el valor de los defectos de los parámetros de la geometría de vía. Acrecen, aún, factores relacionados con el tipo de estructura de la vía, la tipología de los vehículos que explotan la línea y el sistema de explotación. Los resultados del presente análisis a varios elementos y secuencias de trazado permiten sacar las siguientes conclusiones:

- a una menor extensión de alineación recta y alineación circular corresponde una mayor perturbación verificada en los defectos del ancho de vía, agravados o minimizados por los parámetros de los elementos colaterales, que ofrecerán siempre una dinámica propia;
- alineaciones circulares de menor extensión, con elevada curvatura y peralte, originan una mayor dificultad en el mantenimiento de la nivelación transversal;
- entre dos curvas de sentido contrario con punto de inflexión donde no exista una sola transición, se verifican defectos de ancho de vía superiores a los verificados en una transición única;
- la resistencia ofrecida por las curvas de radio reducido cuando se sobreponen con pendientes de inclinación elevada, introduce defectos más significativos en el parámetro ancho de vía, que cuando se sobreponen con pendientes de inclinación más moderada;
- los defectos del ancho de vía verificados en las curvas donde están aplicados sobreanchos sugiere que las mismas deban ser dimensionadas teniendo en cuenta las características de la infraestructura (geometría de la vía, armamento y ancho de vía) y las características de los vehículos (embasamiento, diámetro de las ruedas, etc.);
- las vías con juntas representan puntos críticos del trazado, siendo por eso soluciones a evitar.

El impacto que los defectos de los parámetros de la vía tienen en el mantenimiento de su geometría y en el comportamiento de los vehículos cuando realizan su marcha, exige mucho rigor en la definición del trazado y en las soluciones adoptadas para la vía. Estos factores son fundamentales para la minimización de costes, sea de manutención de la vía, sea del material rodante, a lo largo del período de vida útil del sistema.

La diversidad de combinaciones posibles en la evaluación de todos los defectos de la geometría de la vía transforma estos estudios en una tarea dura y prolongada. Pero, si es efectuada de forma continuada, permitirá optimizar, e incluso establecer, un conjunto de nuevas reglas a observar en la concepción del trazado en lo que concierne al confort y seguridad y evitar costes añadidos al mantenimiento de la vía.

## 5. Referencias bibliográficas

- [1] Allias, Y. (1984). *La Voie ferrée technique de construction y d'entretien*. Eyrolles, Paris, France, pp. 1-514.
- [2] Esveld, C. (2001). *Modern railway track*. MRT - Produtions, Zaltbommel, Netherlands, pp. 1-645.
- [3] Gonçalves, E. (1974). *Caminhos-de-ferro*. AELEST, Lisboa, Portugal, pp. 1-307.
- [4] IPQ (2007). *NP ENV 13803-1:2007 - Aplicaciones ferroviarias – Parâmetros de proyecto de traçado de via – Ancho de vias de via de 1435 mm y de valor superior – Parte 1: Plena Vía*, Instituto Português de la Calidad, Lisboa, Portugal, pp. 1-94.
- [5] Lupiáñez, S. (2010). *Modelización de la interacción vía-tranvía*. Trabajo fin de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya, PrémioComsa EMTE de ferrocarriles, IX Edición, Catalunya, España, pp. 1-159.
- [6] Maynar, M. (2008). *Apuntes de introducción a la dinámica vertical de la vía y a las señales digitales en ferrocarriles*. GráficasGallagor, Madrid, España, pp. 1-797.
- [7] Molinari, Y. (1999). *Éléments de mécanique ferroviaire: Relations entre paramètres de voie, sécurité et vitesses de circulation*. Groupe interdisciplinaire de réflexion sur les traversées Sud-Alpines et l'aménagement du territoire Maralpin, Menton, France, pp. 1-22.
- [8] REFER (2008). *IT.VIA.002: Ancho de vias de via larga, sobrelarguras y tolerâncias*. Rede Ferroviária Nacional, Lisboa, Portugal, pp. 1-3.
- [9] REFER (2009a). *IT.VIA.018: Tolerâncias dos parâmetros geométricos de la via*. Rede Ferroviária Nacional, Lisboa, Portugal, pp. 1-18.
- [10] REFER (2009b). *IT.VIA.019: Verificación de las yuntas dos carris. Tolerâncias*. Rede Ferroviária Nacional, Lisboa, Portugal, pp. 1-8.
- [11] REFER (2009c). *IT.VIA.021: Tolerâncias de desgaste del perfil del carril*. Rede Ferroviária Nacional, Lisboa, Portugal, pp. 1-7.



## Fault diagnosis in track circuits based on fuzzy models

### *Diagnóstico de fallo para circuitos de vía basado en modelos fuzzy*

Nuno Silvério Barrento; José Maria Coutinho Guerra (\*)

REFER, EPE – Portuguese Railway Infrastructure Manager. Lisbon, Portugal

#### Resumen

*La gran importancia del transporte de personas y mercancías a través del sistema ferroviario está condicionada a factores como velocidad, seguridad, economía y medio ambiente.*

*Los trenes son detectados/"localizados" por circuitos eléctricos (llamados circuitos de vía) usando los raíles como medio de transmisión, su funcionamiento es afectado por cambios en la impedancia de la vía, dando lugar a gran susceptibilidad de operación y altas tasas de averías.*

*Considerando que el método de diagnóstico de fallo es basado en modelo, se utilizarán modelos fuzzy en este enfoque. Cuando no se conocen todos los parámetros del proceso, el uso de modelos fuzzy puede ser una buena opción para el modelado. El diagnóstico de fallo en los circuitos de vía utilizando conceptos fuzzy puede contribuir a mejorar los índices de rendimiento del ferrocarril, lo que permite la detección temprana de fallos.*

*Palabras clave: modelado fuzzy, diagnóstico de fallo, algoritmo, control, modelo, circuito de vía, señalización, ferrocarril, vía, fiabilidad, disponibilidad, seguridad.*

#### Abstract

The vast importance of people and goods transportation through the railway system is due to factors such as speed, safety, economic and environmental.

Being trains detected/"located" by electrical circuits (called track circuits) using the rails as transmission medium, its operation is affected by changes in track impedance, imposing great susceptibility of operation and high failure rates.

Considering that the fault diagnosis method is model-based, fuzzy models will be used in this approach. When all process parameters are not known, the use of fuzzy models can be a good choice for modeling. The fault diagnosis in track circuits using fuzzy concepts can contribute to improve the performance indexes of railways, enabling early detection of faults.

keywords: fuzzy modeling, fault diagnosis, algorithm, control, model, track circuit, signalling, railway, track, reliability, availability, safety.

\* nsbarrento@refer.pt; jcguerra@refer.pt

## 1. Introduction

The signalling systems regulate the movement of trains and for this reason are governed by high levels of safety, ensuring the necessary spacing between trains running in same direction, preventing head-on collision and avoiding the flank impact at conflict points. For this reasons it is necessary to know, in a safe way, the effective position of trains. The availability criteria is also a major factor in railway operation, due to the fulfillment of operational schedule in order to achieve an efficient usage of infrastructure and a high reliability of signalling systems.

In order to promote the safety and availability of railway system artificial intelligence techniques can be used to diagnose faults in signalling systems and especially in track circuits, as these are elements of great importance in railway operations. In this point of view the *fuzzy* logic adoption has advantages in cases wherein the uncertainties about the system are significant, as in track modeling, which leads to adopt *fuzzy* concepts to fault diagnosis in track circuits. The main advantage of this approach lies in no need of the use of precise and accurate analytical models of real system, allowing to obtain the relation of input-output data by *fuzzy* models of TS (Takagi-Sugeno) type. The ability of representing nonlinear systems by aggregation of several local linear models implies a good performance of TS techniques on systems modeling.

### 1.1. Specifics of railways

From the signalling point of view, the detection of trains position, associated with the emission of electrical signals by rails, is technically designated by “track circuit”. This device consists in a transmission module and a reception module, using the track as physical transmission medium. Track circuits were created in the United States about a century ago and later used throughout the world. Currently, the Portuguese railway network is using thousands of these devices, implying that these are critical elements to ensure the availability of railway infrastructure and consequently of this transportation mode.

Track circuits are the main method to detect the position of trains worldwide, used both in “heavy” systems (conventional and high speed) and in mass transit networks (namely commuter lines and underground lines).

The several components comprising the track circuit are subject to fault modes (due to aging, weather conditions and track maintenance) which must be detected as early as possible in order to keep the system operating according the required levels of safety and availability. To achieve this aim, automatic processes are used for monitoring and diagnosis, leading to more efficient maintenance policies<sup>1</sup>. For these reasons, the potential benefits of monitoring and diagnosis in track circuits include:

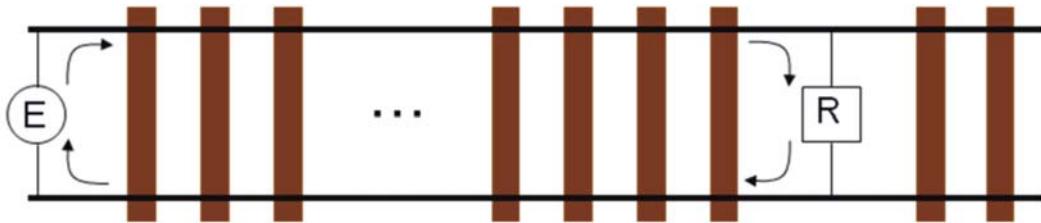
- Possibility of a post analysis of incidents by improving the fault detection capability through processes of fault location and classification;
- Maintenance cycles reduction, whereby the cycle of periodic on-site inspection may be wider;
- Track circuits availability improvement, by reducing the failure periods during operational hours and by decreasing the trains delays;

---

<sup>1</sup> The fault diagnosis has strong appeal in the engineering of preventive maintenance.

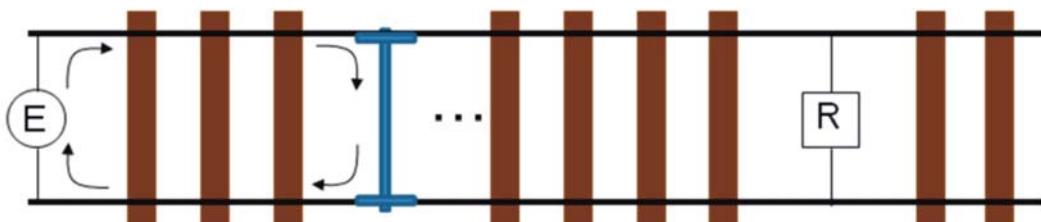
- Costs reduction of preventive and corrective maintenance, as track circuits components can be replaced and repaired in time to prevent failures;
- Improving the performance of track circuits, optimizing the signalling system operation, reducing penalties costs and increasing the quality of provided railway services.

A track circuit is made with an electrical signal emission module at one end of a section of rails and a reception module at the opposite end of the defined section (separated by the track), both being in permanent communication during the train absence<sup>2</sup>, which comprises the operating state called free track circuit, as illustrated in figure 1.



**Figure 1:** Track circuit principle operation (free steady-state).

The information transmitted through the rails is associated to trains positioning system, which is affected automatically by the presence of train in a track circuit, as illustrated in figure 2, wherein the communication between the emission and the reception modules is interrupted (absence of electrical current at track circuit reception point). This track circuit occupation is then “transmitted” to the train that circulates in rear, ensuring a minimum safe distance between trains and avoiding collision. The transmission track circuits states to the drivers is materialized, optically, by lineside signals, showing different light aspects according to safety conditions and the current exploitation status.



**Figure 2:** Track circuit principle operation (occupation by train).

Additionally to track circuits application in train detection, there are (not in the Portuguese railway network) inductive sensors (coils) installed on trains in a front position of head wheels, used to capture the driving information transmitted continuously on rails. This information is processed on-board and displayed on driver’s panel. The information transmitted includes safety functions, ATP (Automatic Train Protection), and also non-vital information, ATO (Automatic Train Operation) and ATS (Automatic Train Supervision) [2].

<sup>2</sup> This principle reflects the intrinsic safety (fail safe) state, using the negative logic as operation basis.

Currently, in the Portuguese railway network, there are many types of track circuits and the more recent are based on electrical signals with frequency modulation of FSK (Frequency Shift Keying) type. This latest track circuits generation is supported by electronic circuits operating in audio-frequencies, so called audio-frequency track circuits. These are sophisticated equipment, included some of them (those of more recent design) internal processing capabilities. These are track circuits with high-level of complexity because they are designed to allow external monitoring and some kind of remote configuration and electronic adjustment.

Depending on track characteristics, the technology used and mounting typology of track circuits, the maximum range of one track section can reach up to about 1.5 km length.

All the safety critical systems are based on a negative logic operation, e.g., have as normal state the less restrictive situation in order that the system changes (fall) immediately to the safe state if a fault, a failure, a malfunction or a processing discrepancy occur. However, this safety premise, in case of failure on train detection system (which will consider in case of failure that a train it's occupying the section), carries very significant delays in train movements, which justifies the adoption of automatic mechanisms for fault detection and isolation.

## **1.2. Fault detection and isolation**

Complex industrial systems, which include railway transportation system, need to be monitored continuously in order to early detection of faults (operation discontinuities) so that they can ensure high safety levels, providing a good quality of service and reduce the economic burden.

FDI (Fault Detection and Isolation) techniques can be used for real time monitoring of critical systems and operate based on following principles:

- Detection, which verifies the existence of faults;
- Isolation, that determines the fault type occurred, through the location (actuators, process, sensors, etc.) and the temporal behavior of fault – this stage occurs after the detection phase;
- Identification<sup>3</sup>, which resolves the intensity and extent of faults.

Several approaches can be adopted to implement an automatic FDI system, depending on the available knowledge about the system under study. The FDI methods allow a model-based approach.

In many cases, the data collected during on-site inspection actions is analyzed empirically (without automation) by maintenance technicians, with the aim of identifying any anomalies. Thus, it becomes necessary an automatic data evaluation (provided by FDI mechanisms) to reduce the time spent in data analysis phase and to improve the performance of diagnostic tasks, allowing the maintenance technicians to have a rigorous and systematic analysis of data to optimize the preventive maintenance plans – in an intelligent maintenance paradigm.

---

<sup>3</sup> The identification phase is often confused with fault insulation, which are closely linked and interdependent tasks.

To ensure a good coverage, the FDI model-based approach requires some system knowledge to enable the extraction of relevant technical features, as well as a large and cataloged database, covering most of operational situations that may occur in real environment.

The analytical redundancy is presented as a versatile FDI approach. It uses the process model for checking the consistency of signals by comparing the measured signals and their estimation by model. However, the models definition for nonlinear complex systems is very difficult, because in general some of the parameters to use in mathematical equations that are part of models aren't accessible [1]. Given the *fuzzy* modeling characteristics, it is assumed that is an effective tool under the conditions mentioned above.

Addressing the signalling systems and particularly the track circuits may be noted that the systems diagnosis purpose is to provide accurate information to the maintenance technicians about the fault patterns in track circuits operation, thus ensuring high quality of provided information.

Track circuits use a scheduled regular maintenance regime being this kind of maintenance very costly. The ability to diagnose faults in track circuits allows a quick and timely response to malfunctions, which bring significant economic advantages. However, sudden failures can occur between scheduled inspections. In this context, only the urgent maintenance can be performed during the higher traffic density hours, which imply high costs due to preventive maintenance be performed only at nighttime without trains.

There are a significant number of faults in track circuits which, after analysis on-site, are classified as "undetected failure" or "normalized without action", situations that can be and should be evaluated through fault diagnosis systems and remote monitoring, condition that will reduce the maintenance burden and the operational costs.

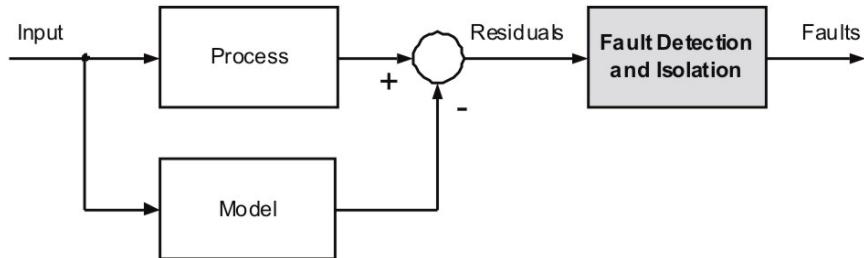
### 1.3. Fault diagnosis based on fuzzy models

When the processes characteristics and the operating conditions aren't entirely known to use *fuzzy* models is a very attractive option, allowing to describe the processes without the use of complex techniques for modeling nonlinear systems.

There has been a growing trend in the interest of obtaining *fuzzy* models using data acquired by measurement. If there is no knowledge about the processes characteristics, rules and membership functions of *fuzzy* models can be obtained based on process measurement data. This methodology allows an easy model achievement and the possibility to insert additional rules based on expert's experience, usually in areas that weren't covered by process measures. *Fuzzy* logic can integrate information from different sources, such as physical laws, numerical data or heuristics. The *fuzzy* modeling has some advantages compared with other modeling methods such as mathematical modeling and neural networks. When the *fuzzy* modeling is used it is possible to obtain a more clear process representation under study and also a linguistic interpretation in the form of rules.

The proposed approach for fault detection in track circuits uses a *fuzzy* model operating without faults. The data used to obtain this *fuzzy* model were achieved through a simulated model of process because weren't available real data. Fault detection occurs when the residuals amount exceeds a predetermined value. The residuals are result from comparison the *fuzzy* model outputs with the real data of process outputs, as depicted in figure 3. Thus, the residuals are processed using *fuzzy* decision techniques and thereby the faults are detected and isolated.

The residual signal contains information about faults as well as the uncertainty effect in the model, requiring to establish residual limits to avoid false alarms (if the residual signal exceeds the range defined by the limits the alarm is activated, otherwise the system operates in a fault-free mode).

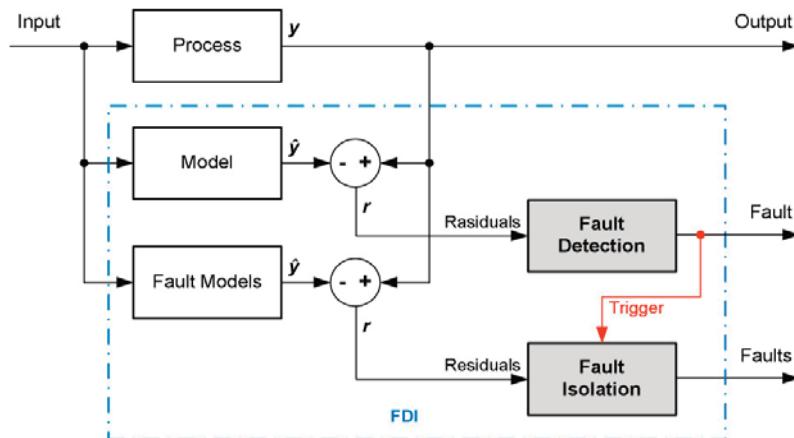


**Figure 3:** Structure type of model-based FDI.

The model-based residuals generation is obtained by residual evaluating for each of  $n$  models, one for each fault type. Thus, at time instant  $k$ , the residual is calculated for each fault in accordance with:

$$r_i(k) = y_i - \hat{y}_i \quad (1)$$

In which  $y_i$  represents the process output and  $\hat{y}_i$  the observer output of fault with index  $i$ , wherein  $i=1, \dots, n$ . The fault isolation is the phase that follows the fault detection (after activated). This stage uses as many fuzzy models as faults to isolate, as shown in figure 4.



**Figure 4:** Fault isolation activation by fault detection stage.

The comparison between the outputs of each *fuzzy* model of faulty process and the process data originates several residuals, one for each fault model, allowing investigate the fault occurred. This investigation occurs when the residual value is close to zero. In this context, it becomes necessary to have knowledge of several kinds of faults, so as to create *fuzzy* models for each of possible faults.

## 2. Process Modeling

In projects involving railway safety and simultaneously the rails usage as transmission medium of electrical signals for command and control, the most difficult obstacle to overcome is related to track electrical characterization.

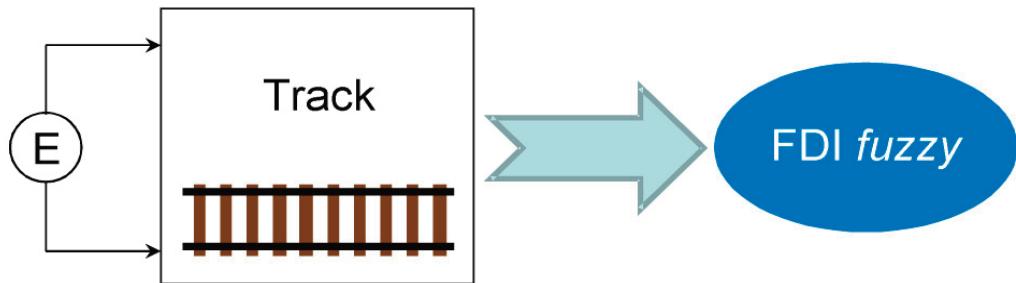


Figure 5: Measuring the track parameters.

In order to evaluate the track characteristics as appropriate physical transmission medium for track circuits operation it becomes necessary to develop the proper equivalent electrical model. This model will be used to generate process data and thus obtain the *fuzzy* models for use in fault diagnosis.

*Fuzzy* models of TS type usually have better performance in systems modeling than other structures. This capability is due to the ability representation of nonlinear systems by aggregation of several local linear models/approximations [6], as shown in figure 6. Therefore, the TS *fuzzy* models will be used in FDI architectures for track circuits, as illustrated in figure 5.

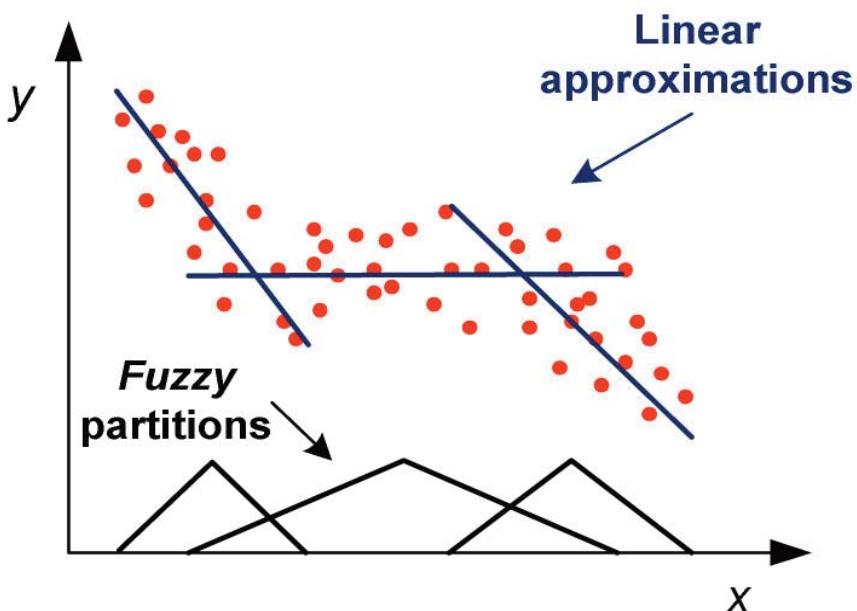


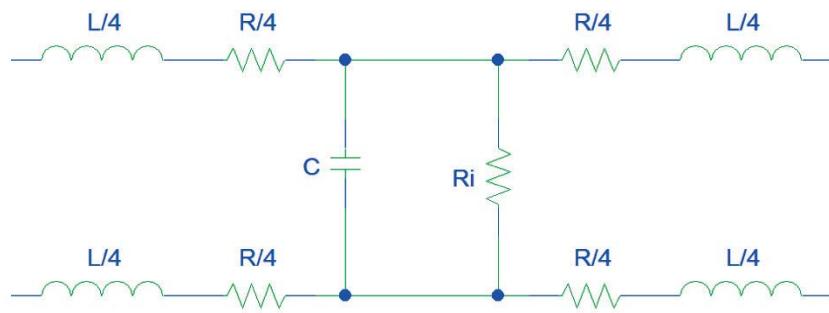
Figure 6: Local linear approximations of a nonlinear system.

The local linear approximations are obtained by dividing the input space into several subspaces (clusters), one for each linear relationship between input and output, using the aggregation (clustering) algorithm Gustafson-Kessel [3]. The *fuzzy* clustering algorithm Gustafson-Kessel presents generally as the most widely used in solving problems of modeling and identification for dynamic processes. This algorithm served as basis for modeling the track and subsequently the track circuit.

## 2.1. Track model

The reference values for electrical track characteristics, then presented, have as main study focus the UIC60 standard rail and the European gauge, with the assumption of an ideal track insulation (both rails are electrically insulated from ground).

A first approximation to the track impedance was achieved by the definition of biquadratic cells [5], whose quadripole is illustrated in figure 7.



**Figure 7:** Equivalent electrical model of track.

The typical values used in model characterization are obtained from experimental abacuses [4] with a dynamic measurement range between 1 Hz and 25 kHz, being the spectrum band which better ensures:

- The propagation of electrical signals through the track in audio-frequencies range (limited bandwidth);
- The signal encoding usage in order to ensure immunity to interferences associated with electrical traction systems (with relevant harmonic contents located up to 20 kHz);
- The frequency band with higher occupancy rate is between 0 and 10 kHz, whereby the band more favorable is between 10 and 20 kHz, recommending a central frequency value around 15 kHz.

Each quadripole is built based on knowledge acquired about the track physical behavior, presenting as fundamental parameters the following electrical quantities:

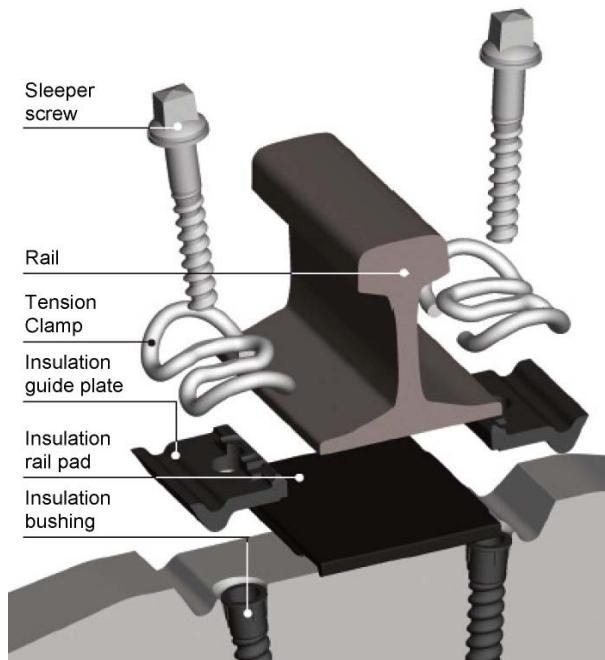
*L*: Longitudinal inductance of rails (typical value between 1 and 2 mH/km) – is a physical quantity that varies proportionally with the electrical traction current that flows through the rails;

*R*: Longitudinal resistance of rails (typical value around dozen  $\Omega/\text{km}$ ), which completes the rails inductive effect and that also varies in proportion to electrical current of return traction;

$C$ : Cross capacitance between the rails and with the ground (typical value of dozens of nF/km) – at track circuit working frequency the value of capacitive component in track impedance is negligible compared to insulation resistance;

$R_i$ : Insulation resistance between rails (minimum value of  $1.5 \Omega \cdot \text{km}$  and may go up to  $10 \Omega \cdot \text{km}$  under ideal conditions) – physical quantity very dependent of track conditions, particularly in accordance to ballast quality and of atmospheric conditions.

The track insulation is a very important factor in track circuits operation, this insulation being guaranteed in the way that is shown in figure 8.



**Figure 8:** Rail fastening (track insulation).

Note that when the variation of track characteristics around the nominal values is significant, implies a seasonal adjustment of track circuits regulation parameters and constituent components (example summer and winter) in order to ensure a proper and safe operation of the equipment. This principle underlies the preventive maintenance theory, which can be achieved efficiently using fault diagnosis techniques employing fuzzy concepts.

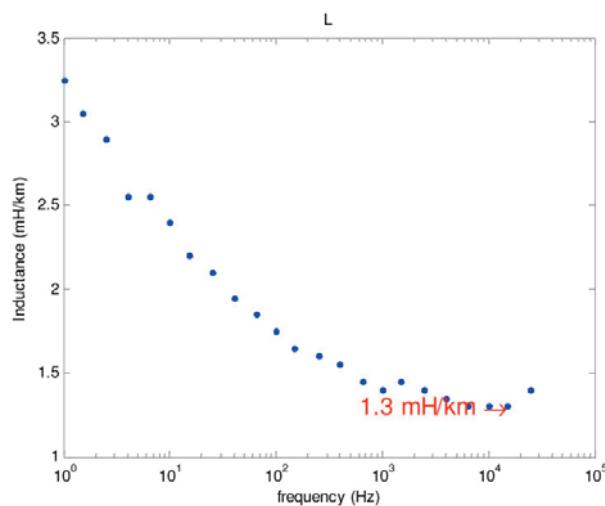
Typical values of track parameters to be applied to process model are, as can be seen in figures 9 to 12 (for 1 km length):

1.3 mH for longitudinal inductance of rails;

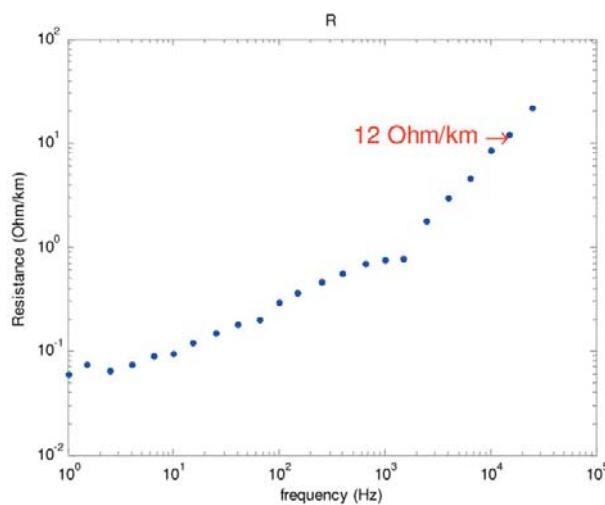
$12 \Omega$  for longitudinal resistance of rails;

80 nF for cross capacitance between rails;

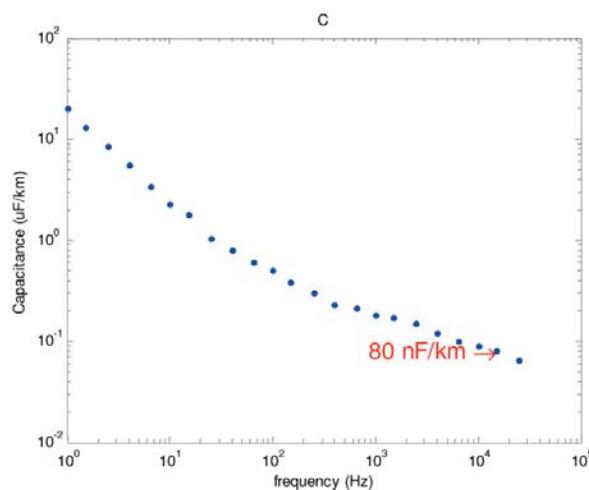
5.7 S for conductance of the track.



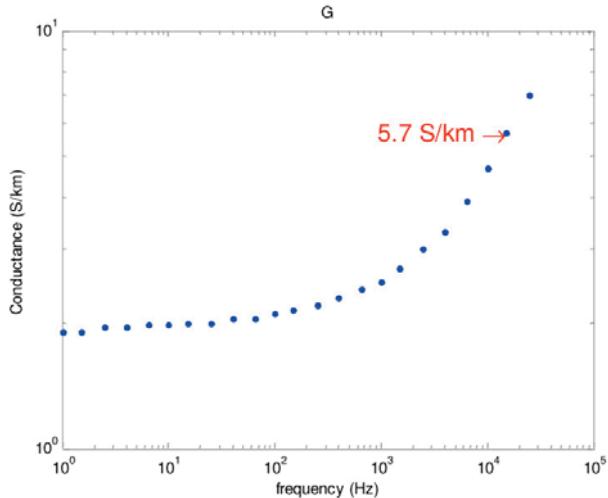
**Figure 9:** Model parameters of track (longitudinal inductance).



**Figure 10:** Model parameters of track (longitudinal resistance).



**Figure 11:** Model parameters of track (cross capacitance).



**Figure 12:** Model parameters of track (cross conductance).

In practice, the parameters of resistance  $R$  and inductance  $L$  vary slightly with the type of rail used and with the track construction elements (sleepers, ballast, etc.). However, the parameters of capacitance  $C$  and conductance  $G$  vary strongly with local environmental conditions and geological track assembly.

The relationship between the transfer function of track electrical model and the corresponding parameters of simulation module (see figure 13) is then presented in order to illustrate the simulation performed.

$$\begin{aligned}
 H(S) &= \frac{\frac{1}{L \times C}}{S^2 + S \left( \frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right) + \left( \frac{1}{L \times C} + \frac{R \times G}{L \times C} \right)} = \\
 &= \frac{9,6154 \times 10^9}{S^2 + 7,1259 \times 10^7 S + 6,6731 \times 10^{11}} = \\
 &= \frac{mn0}{S^2 + dn1 \times S + dn0}
 \end{aligned} \tag{2}$$

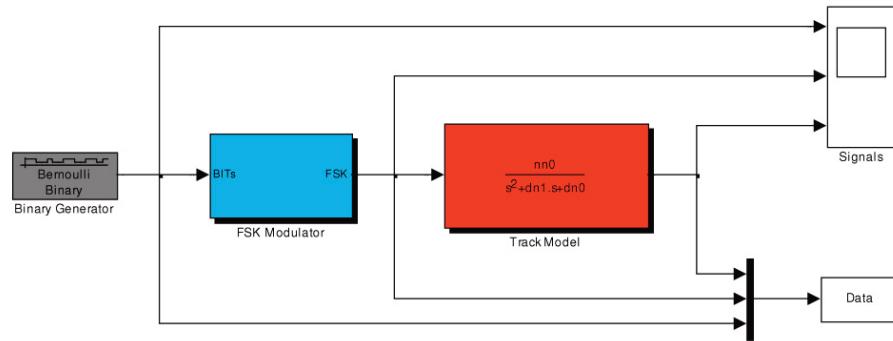
In the model gain function, when it increases the complex frequency  $S$  verifies that the gain decreases and the attenuation value becomes consequently very high, which difficult the signal propagation. This effect summarizes the low-pass filter behavior.

## 2.2. Track circuit model

The emission voltage of audio-frequency track circuits typically ranges between 1 and 10 volts depending on technology and manufacturer. The voltage applied to rails requires the fulfillment of specific requirements regarding the safety of people who interact with the track, these are railway staff or ordinary citizens.

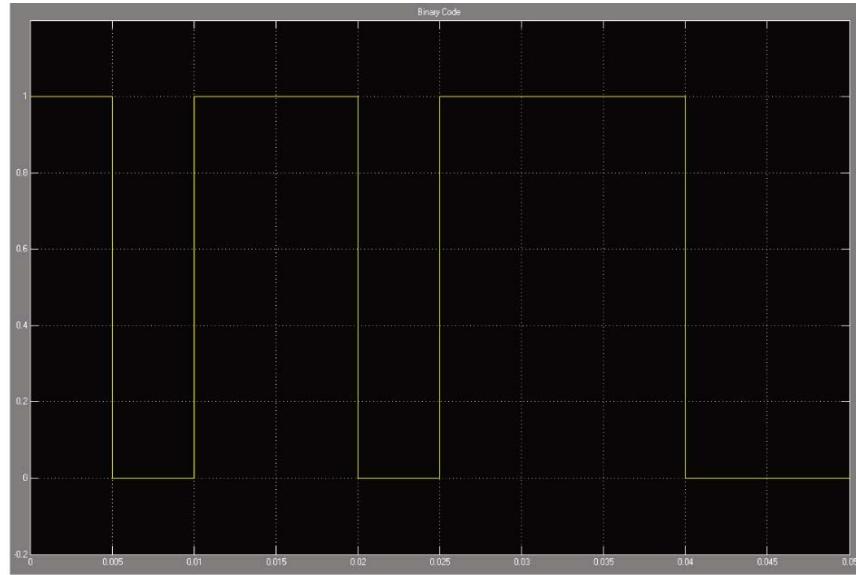
Coded track circuits, because of its bigger immunity to interference present in railway environment, have the advantage of reducing the signal magnitude injected into the track as well as increasing the reception module sensitivity, thus enabling the discrimination of electrical signals with much smaller amplitudes, conferring robustness to the track circuit.

Typical values of reception module sensitivity for audio-frequency track circuits are between 10 and 200 mV, whose premises are related to transmitting signal level by emission module and the distance to overcome by electrical signal. However, the magnitude of encoded signal at reception point must be such that has a margin in light of receiver module sensitivity – FSK track circuits used in the Portuguese railway network are regulated to 900 mV (at reception point).



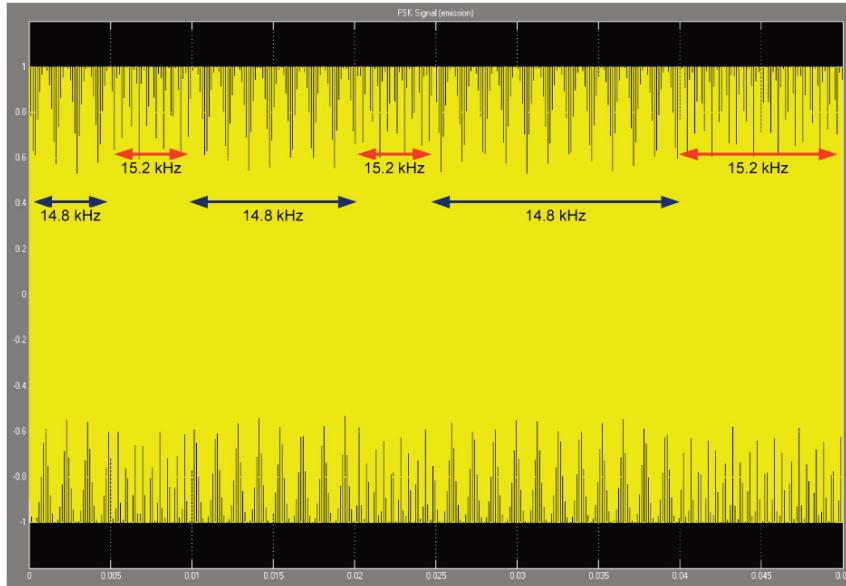
**Figure 13:** Track circuit block diagram.

The track circuit simulation structure is based in two fundamental parts, being the first composed by the track circuit components (integrating the binary code block generator and the FSK modulator block) and the second composing the characteristic electrical model of the track (modeled by quadratic function in complex frequency  $S$  domain) as illustrated in figure 13.



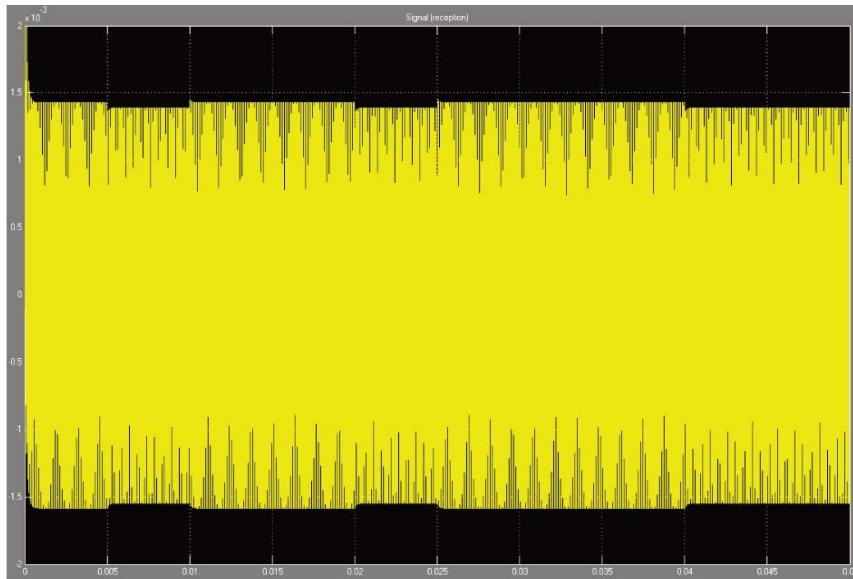
**Figure 14:** Track circuit encoding signal.

The binary code used in track circuit modeling, simulated by Bernoulli<sup>4</sup> series, shows a bit 0 occurrence probability of 0.4, thereby obtaining a 0.6 value for bit 1 probability, as can be seen by examining figure 14.



**Figure 15:** Track circuit emission signal.

Looking at figure 15 it is possible to match the two logical levels of BFSK (Binary Frequency Shift Keying) modulated signal at upper and lower frequencies for emission and reception track circuit signals, which are illustrated in greater detail in figure 17.



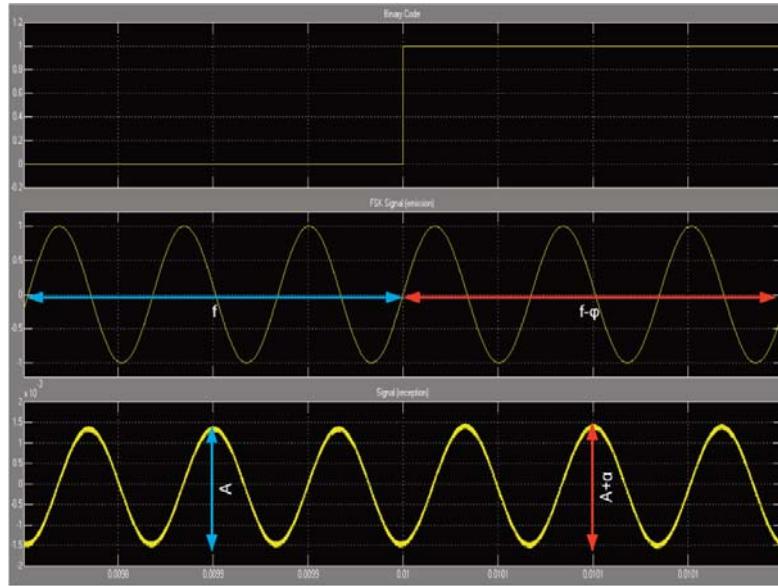
**Figure 16:** Track circuit reception signal.

The effect of different attenuation levels to lower and upper frequencies of BFSK reception signal is checked on output signal variable envelope of simulation chain (see figure 16), summarizing the low-pass filter behavior, with higher attenuation at upper frequency of BFSK signal, of  $15.2 \text{ kHz}$  ( $f_0 + 200 \text{ Hz}$ ), which corresponds to modeling the logical level 0 of track circuit binary code.

---

<sup>4</sup> The Bernoulli distribution is a discrete distribution in the sample space  $\{0, 1\}$  with probabilities  $P(0)=1-p$  and  $P(1)=p$ . The distribution name is allusive to the Swiss scientist Jakob Bernoulli, mentor of theory..

The frequency shift of BFSK modulation is confirmed visually by counting the cycles number when it is active the logical value 0 (slightly more than 3 cycles of sinusoid in the considered extract of data— see figure 17) compared to homologous analysis to the extract representing the logical value 1 (less than 3 cycles), which corresponds to a higher frequency associated to logical level 0, as expected.



**Figure 17:** Details of track circuit emission and reception signals.

The data thus generated (associated to FSK track circuit operation with 1 km length) and that above were characterized in detail, provide the basis for experimentation of model-based fault diagnosis techniques, whose results are presented in next section.

### 3. Results of fuzzy FDI

The proper adjustment of models to reality, for processes with and without faults, is proved by performance results obtained for the faulty and fault-free models of process, allowing thus to evaluate the TS fuzzy models performance in performing tasks of fault detection and isolation in track circuits.

To measure the performance of *fuzzy* models obtained for the process to operate faultlessly and under the influence and faults is used, as a normalized residual measure, the calculation method of variance accounted for, VAF (Variance Accounted For performance index for the model), mathematically defined as it follows:

$$VAF = \left[ 1 - \frac{cov(y_i - \hat{y}_i)}{cov(y_i)} \right] \times 100\% \quad (3)$$

Where  $y_i$  represents the process output and  $\hat{y}_i$  the *fuzzy* model output.

To ensure the duality of analysis was used another performance index by calculating the mean square error RMS (Root Mean Squared error) between the process output data and the *fuzzy* model outputs, whose expression is presented below:

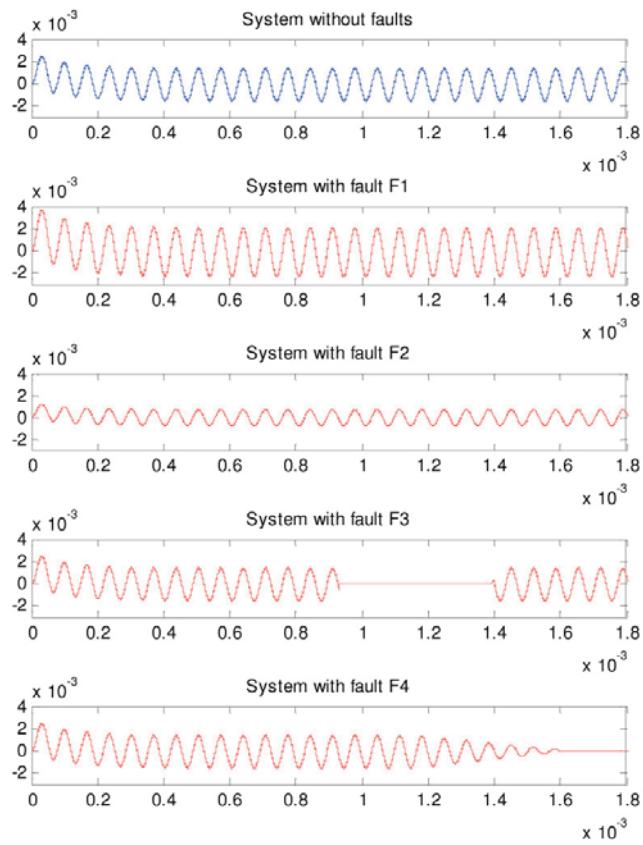
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (4)$$

Where  $N$  represents the number of data used.

Through analysis of expressions 3 and 4 it turns out that the VAF and RMS performance indexes are normalized residual measurements, presenting the residual evaluation terms  $y - \hat{y}$ , as indicated in (1).

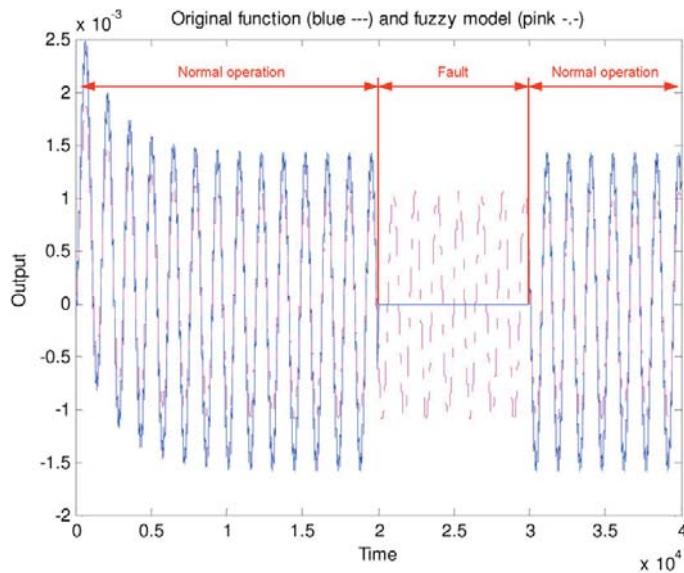
### 3.1. Residual generation

The VAF and RMS performance indexes are a numerical translation of generated residuals, allowing thus a rapid evaluation of achieved performance in fault-free and faulty models generation.



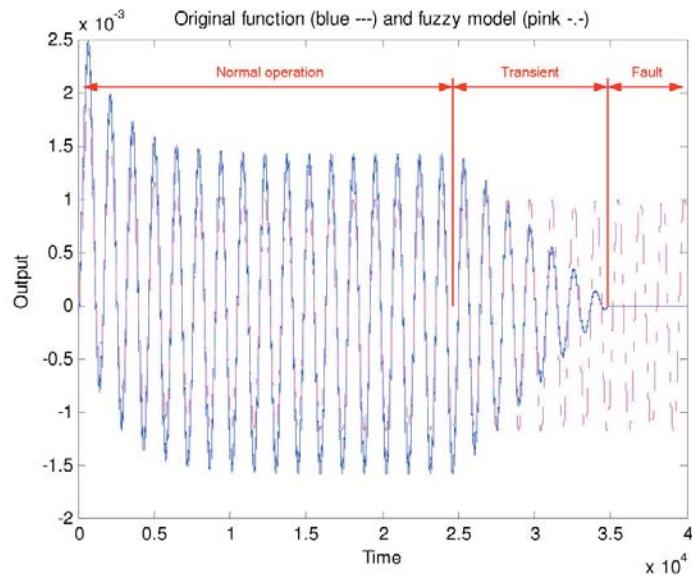
**Figure 18:** Fault modes of process output signals.

The approach used in establishing the most appropriate *fuzzy* parameters, supported on trial and error method, revealed that fault types  $F_1$  and  $F_2$  have the same results as for system to operate faultlessly, because they follow the same sinusoidal temporal pattern (same operating frequency, but with different magnitudes, according to fault type), as can be verified in figure 18. However, despite the differences in magnitude compared to process output signal to operate faultlessly, the modulation of fault types  $F_1$  and  $F_2$  have VAF values of approximately 99.75%. The results obtained for the performance indexes of the latter two fault patterns aren't satisfactory (see *fuzzy* modeling result in figures 19 and 20), materializing lower values for VAF, between 75% and 80%, and high RMS values, between  $400 \times 10^{-6}$  and  $450 \times 10^{-6}$ .



**Figure 19:** Signals corresponding to fault mode  $F_3$ .

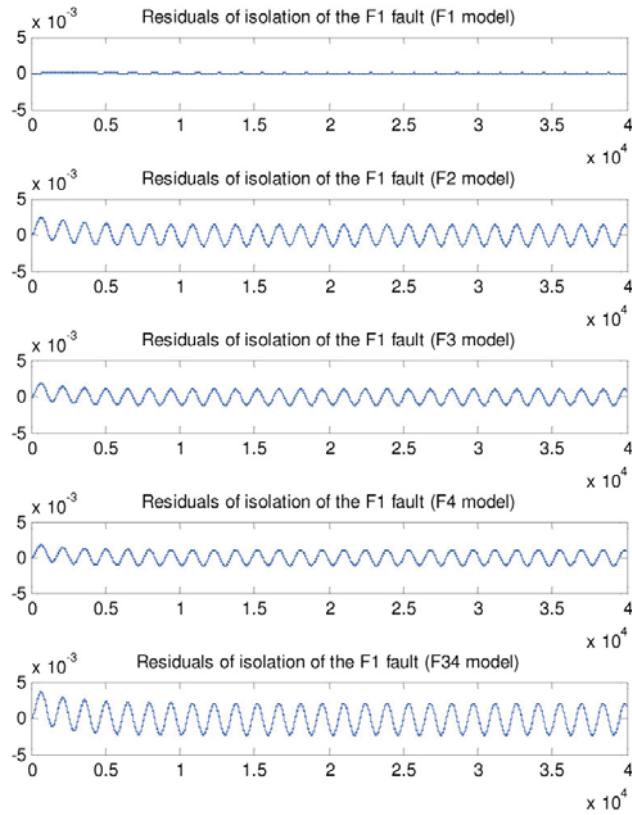
Once the *fuzzy* models determination for fault types  $F_3$  and  $F_4$  based on data comprising states of normal operation, transient state and steady-state (see figures 19 and 20) the achievement of a credible model isn't successful. Thus, *fuzzy* models were calculated only based on fault steady-states, e.g., in the zone corresponding to effective fault data (ignoring the normal operation and transient states) and in which learning for model building isn't negatively affected.



**Figure 20:** Signals corresponding to  $F_4$  fault mode.

Following what has been described above concerning to several states that decompose the faults, we chose to characterize a single failure state (null signal zone  $F_{3-4}$ ) for fault patterns  $F_3$  and  $F_4$ , confirming that the process output signal was approached perfectly by the *fuzzy* model, which corresponds to a VAF performance index of 100% and RMS of zero.

Obtained the fuzzy models for the process to operate faultlessly and operating under influence of faults  $F_1, F_2, F_3$  and  $F_4$  ( $F_{3\_4}$ ), it is necessary to evaluate the fault detection and fault isolation stages.



**Figure 21:** Residual representation of  $F_1$  fault isolation.

As illustrative summary of generated residuals at fault isolation stage are shown in figure 21 the residual signals for each fault type, which translates visually (residual signal tending to zero) if a fault is or not correctly isolated.

### 3.2. Fault detection

In obtaining the fuzzy model for the FSK transition cycle with frequency  $f_0 - 200$  Hz were used three clusters. In figure 22 it can be seen, as expected in view of good performance, that the achieved approximation by fuzzy model closely overlaps the process output data (excluding the Gaussian noise observed in output signal).

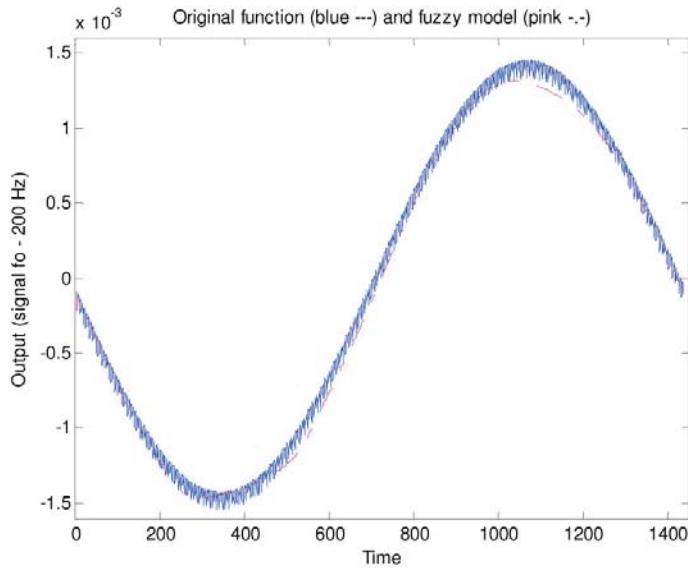


Figure 22: Process output signals ( $f_0$  – 200 Hz frequency component).

Given the results obtained for RMS performance indexes, which follow the same behavior of VAF as can be seen by table 1 analysis, it is confirmed that fault detection performs coherent (detects all data sets with faults). In this perspective and in light of RMS threshold concept for fault detection, may define the  $100 \times 10^{-6}$  value as a fault detector criterion (error accounting value above which the fault is detected).

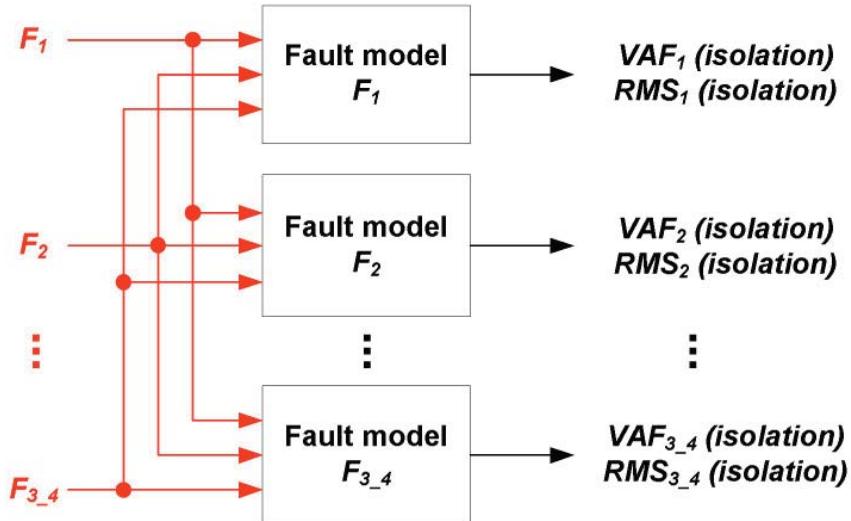
	Data $F_0$	Data $F_1$	Data $F_2$	Data $F_3$	Data $F_4$	Data $F_{3\_4}$
VAF	99.75	88.59	0.63	67.90	71.88	0.00
RMS ( $\times 10^{-6}$ )	51.78	531.07	522.45	516.67	471.15	1000.00

Table 1: VAF and RMS performances on fault detection.

In particular, highlights that the VAF and RMS results for the data  $F_{3\_4}$  (fault data corresponding to common area of fault types  $F_3$  and  $F_4$ ) have extreme values, as corresponding to electrical signal absence at track circuit reception point.

### 3.3. Fault isolation

After fault detection stage follows, in processing chain, the fault isolation stage, which presents a data combination quite different from previous because all fault data are combined with all fault models (see figure 23 diagram).



**Figure 23:** Fault isolation scheme.

The threshold values used for fault isolation (also used in fault detection stage) were obtained through experimentation and are limited by:

$$\begin{aligned} \text{VAF} &> 95\%; \\ \text{RMS} &< 100 \times 10^{-6}. \end{aligned}$$

It is thus, by analysis of table 2 results, the data that make up the fault type  $F_1$  only combine in VAF performance with the model  $F_1$ , the data that correspond to fault type  $F_2$  only match in VAF performance with the model  $F_2$  and the data that aggregate the steady-state of fault types  $F_3$  and  $F_4$  only correspond to model  $F_{3\_4}$ .

VAF	Model $F_1$	Model $F_2$	Model $F_3$	Model $F_4$	Model $F_{3\_4}$
<b>Data <math>F_1</math></b>	<b>99.75</b>	<b>55.32</b>	<b>74.71</b>	<b>75.23</b>	<b>0.00</b>
<b>Data <math>F_2</math></b>	<b>0.00</b>	<b>99.75</b>	<b>75.23</b>	<b>73.44</b>	<b>0.00</b>
<b>Data <math>F_3</math></b>	<b>3.36</b>	<b>66.76</b>	<b>75.77</b>	<b>75.88</b>	<b>0.00</b>
<b>Data <math>F_4</math></b>	<b>4.10</b>	<b>70.49</b>	<b>80.09</b>	<b>80.22</b>	<b>0.00</b>
<b>Data <math>F_{3\_4}</math></b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>100.00</b>

**Table 2:** VAF performances on fault isolation.

Also noted that the data-model correspondence for  $F_3$  and  $F_4$  don't have acceptable VAF performance. These results are due to the fact that there have generated models (learning phase) with ranges of data that includes three distinct operation zones, as already mentioned above.

In a checking viewpoint of fault isolation stage behavior, now in view of RMS performance index, it shows that the result is consistent with what is obtained by analysis with VAF criteria, as can be seen by comparing tables 2 and 3.

RMS ( $\times 10^{-6}$ )	Model $F_1$	Model $F_2$	Model $F_3$	Model $F_4$	Model $F_{3\_4}$
<b>Data <math>F_1</math></b>	<b>77.66</b>	1100.00	790.52	784.16	1600.00
<b>Data <math>F_2</math></b>	1000.00	<b>25.89</b>	264.73	271.29	524.10
<b>Data <math>F_3</math></b>	896.24	526.39	<b>449.04</b>	451.20	912.75
<b>Data <math>F_4</math></b>	870.02	483.19	396.90	<b>398.50</b>	889.30
<b>Data <math>F_{3\_4}</math></b>	1600.00	522.70	785.60	792.12	<b>0.00</b>

**Table 3:** RMS performances on fault isolation.

As shown for fault detection, also at isolation stage the data comprising the  $F_{3\_4}$  vector assume extreme values for VAF (100%) and RMS (with 0.00) performance indexes, which is due to perfect correspondence between model and process output signals – the electrical signal absence at track circuit reception point implies a stationarity of fault pattern and so a coherent *fuzzy* modeling and *fuzzy* identification.

#### 4. Conclusions

The use of approaches to fault diagnosis has greatly contributed to technical incidents restriction and therefore accidents reduction in different areas as industry, in oil, chemical, nuclear, aerospace, railway, etc., thus minimizing human and materials losses.

The main difficulties arising from model-based fault diagnosis implementation underlie in obtaining models with good performance and in high complexity of processes. However, when there isn't sufficient information (complete) about processes and these are nonlinear, the use of *fuzzy* models improves the fault diagnosis capability. For all of these reasons was materialized the fault diagnosis approach based on model, using *fuzzy* models of Takagi-Sugeno type obtained through data generated by simulated process of a hypothetical track circuit. Applying the fault diagnosis approach based on *fuzzy* models (of Takagi-Sugeno type) to track circuits has proven its potential in FDI stages, with appropriate performance indexes and reaching VAF values close to 100% and RMS results with low values (about  $50 \times 10^{-6}$ ), representing an approximation at all similar to the relationship of input-output data.

In summary, *fuzzy* logic is a theory that fits fully in FDI techniques implementation, particularly when knowledge about processes is approximate and limited such as the track electrical model, whose characteristic electrical parameters are very variable (function of physical properties and of influence that environmental changes lead), and therefore with the track circuits operation mode.

## 5. References

- [1] Luís Manuel Fernandes Mendonça. Controlo tolerante a falhas baseado em modelos *fuzzy*. Instituto Superior Técnico, Portugal, 2007.
- [2] Nuno Barrento. Automatização do sistema ferroviário – paradigmas da sinalização dos metropolitanos. Flecha de Prata Magazine, Clube dos Entusiastas do Caminho-de-Ferro, Portugal, 2011.
- [3] R. Babuska, J. A. Roubos and H. B. Verbruggen. Identification of MIMO systems by input-output TS *fuzzy* models. The 1998 IEEE International Conference on *Fuzzy Systems* Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Pages 657 – 662 / volume 1, USA, 1998.
- [4] R. J. Hill and S. Brillante. Portable measurement equipment for site determination of rail track parameters. Proceedings of the 1998 ASME/IEEE Joint, Railroad Conference, Pages 59 – 64, USA, 1998.
- [5] Roger Rétiveau. La signalisation ferroviaire. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1987.
- [6] Tomohiro Takagi and Michio Sugeno. *Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Volume 15, Number 1, Pages 116 – 132, Japan, 1985.





FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

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

VÍA LIBRE TÉCNICA  
INVESTIGACIÓN FERROVIARIA

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

## Creación de Mapas de Riesgo Ferroviario a partir de mapas de calor de incidencias

### *Creating Railroad Risk Maps from incident knowledge base heatmaps*

José Gómez Castaño\*

<sup>a</sup> Jefatura de Normalización y Nuevos Desarrollos de la Dirección de Gestión de Red e Innovación. ADIF

<sup>b</sup> Consultor Sistemas de Información Ferroviaria. STRUCTURALIA

#### Resumen

Uno de las tareas más importantes a las que se enfrenta cualquier Administrador de Infraestructuras es la de anticiparse a las posibles incidencias que se puedan producir en las mismas. Para ello, lo más efectivo es contar con procedimientos preventivos que se puedan anticipar a las posibles situaciones.

Para conseguir este objetivo, contar con una base de conocimiento es algo fundamental. Es necesario conocer qué tipo de incidencias se han producido y dónde. En este artículo se describe cómo sacar partido a la componente geoespacial de esta base de conocimiento utilizando la técnica de representar las incidencias como mapas de calor o “heatmaps”.

Los mapas de calor son representaciones gráficas en las que se muestran las zonas de mayor actividad de cierta variable. En este caso se presentan las zonas con más incidencias, atendiendo a sus diversos atributos. El resultado es la generación de Mapas de Riesgos.

En este artículo se muestra cómo desarrollar algunos programas que responden a un procedimiento para generar los mapas de calor a partir de los datos de incidencias básicos, y una aplicación web funcional (<http://www.astroide.es/trenes/heatmap.php>).

Palabras clave: sig, mapa de calor, kml, heatmap, incidencias, mapa de riesgo, python, google maps, openlayers

#### Abstract

One of the most important tasks facing any Infrastructure Manager is to anticipate possible problems that may occur in them. To do this, the most effective is to have preventive procedures can anticipate possible situations.

To achieve this goal, having a knowledge base is essential. You need to know what type of incidents have occurred and where. This article describes how to leverage the geospatial component of this knowledge base using the technique of representing incidents such as heat maps or “heatmaps”.

The heat maps are graphical representations shown in the areas of greatest activity of a certain variable. In this case there are areas with more incidents, according to various attributes. The result is the generation of risk maps.

This article shows how to develop some programs that respond to a procedure to generate heat maps from the basic event data.

keywords: gis, heatmap, kml, events, risk maps, python, openlayers, google maps

\* [jgomezc@adif.es](mailto:jgomezc@adif.es)

## 1. Situación actual

Para el análisis de las incidencias, partimos de los registros que se hacen cada vez que se produce alguna en la red ferroviaria. En todos los casos queda constancia de diversos atributos ligados a la misma. Desde el momento en que se produce, elementos de la infraestructura afectados, personal que ha intervenido, tipo de material que la ha producido, si se han visto afectados trenes y cuáles.

Para el trabajo que nos ocupa, el dato más interesante es el lugar donde se ha producido. En la operación ferroviaria, el lugar está ligado a la línea y punto kilométrico dentro de ella, o a una instalación ferroviaria en concreto. Este término es bastante amplio y puede tratarse de una estación, bifurcación, puesto, agujas, instalaciones de seguridad, de electrificación, etc.

Por lo tanto, no hay una relación directa entre la denominación o codificación donde ha tenido lugar la incidencia y su posición geográfica en un mapa. Aunque en el Anexo I de la Directiva INSPIRE [1] se encuentra recogido un modelo relativo a redes de transporte ferroviario, este no ha sido adoptado todavía por ningún Administrador de la Infraestructura. Esta situación será subsanada en el futuro, dado que también se encuentra contemplado la LISIGE [2].

Por este motivo se parte de ubicaciones sin geolocalizar. Las bases de datos que se utilizan tradicionalmente para almacenar este tipo de información no tienen extensiones espaciales, lo que complica la aplicación de una solución puramente geográfica.

## 2. Metodología propuesta

Vamos a crear una base de conocimiento a partir de las incidencias que se van produciendo. Esta se encontrará almacenada en un gestor de bases de datos con extensiones espaciales. El uso de este tipo de bases de datos nos permitirá hacer interrogaciones a la misma en lenguaje SFSQL[3]. Los atributos alfanuméricos seguirán registrándose bajo el mismo modelo que hasta ahora, pero podremos tener la información geográfica en 2 tablas al efecto.

La primera contendrá los puntos relevantes de red ferroviaria, con un campo con la identificación tradicionalmente utilizada para ellos. Su posición geográfica se almacenará en un campo de tipo Geometría, y puede representarse por un punto o un polígono. La segunda almacenará la geometría de las líneas.

El objetivo de estas dos tablas es poder geolocalizar la posición de cada incidencia. Podemos tener dos casos. Que se haya producido en una instalación. Su ubicación se obtendrá cruzando la tabla de alfanumérica con la de ubicaciones. En un segundo caso, la incidencia puede haberse producido en plena vía. En este caso solo disponemos del punto kilométrico y la línea. Para conocer su posición habrá que calcularla aplicando un algoritmo de segmentación dinámica a partir del km en el que se registra.

En este punto hay que llamar la atención sobre una particularidad que existe en cualquier red viaria que cambia con el tiempo. Las señales indicativas de los puntos kilométricos, no equivalen a la posición geométrica. Esto quiere decir que los puntos kilométricos indicados en el terreno, no se encuentran en la misma posición que resulta si tomamos la geometría de la línea férrea. Es lo que produce que en la realidad haya kilómetros con “más de 1000 metros”. Esto se resuelve tomándolos como fenómenos individuales, como si se tratara de un elemento más de la infraestructura, de la misma forma que se codifica en la BTN25 del IGN. Además se necesita una tabla que relacione el punto kilométrico del terreno con el real geométrico.

Si bien el tener en el mismo gestor de bases de datos toda la información le proporciona mucha eficiencia al sistema, se puede optar por otra solución que proporcione opciones de geolocalización a cualquier otra aplicación. La información geográfica se puede exponer a través de un servicio web y ser consumida desde

el resto de aplicaciones. En la actualidad, estos dos métodos se utilizan en la aplicación de gestión de incidencias de forma habitual.

Sea cual sea el sistema elegido para obtener las coordenadas de las ubicaciones de las incidencias, el resultado será que tendremos la posición de cada una de ellas. Conjugando los atributos alfanuméricos y la información geográfica, el resultado de cada consulta proporcionará el conjunto de ubicaciones que cumplan con la Query SFSQL solicitada.

Siguiendo este esquema se pueden hacer consultas para conocer las ubicaciones (los registros) que hayan tenido una incidencia de cierta categoría, o que haya sido producida por cierto tipo de locomotora, tipo de vagón, o cualquier otro tipo de condición a investigar. A continuación se muestra un ejemplo de consulta en la que obtendremos las ubicaciones de las incidencias con codificación 001 y creadas por el tipo de locomotora 333.

```
SELECT incidencias.codUbicacion, ST_AsText(ubicaciones.ubicacion_geom) AS geom,  
ubicaciones.nombreUbicacion FROM incidencias  
inner join ubicaciones on ubicaciones.codUbicacion = incidencias.codUbicacion  
where incidencias.codIncidencia = "001" and incidencias.tipoLocotora = '333';
```

El resultado sería un conjunto de fenómenos ST\_Point o ST\_Polygon, dependiendo del tipo de datos almacenados, y en el SRID correspondiente al sistema de referencia utilizado en la tabla. En el caso de tratarse de un punto kilométrico, se puede construir una consulta similar para obtener las coordenadas del punto buscado como fenómeno ST\_Point.

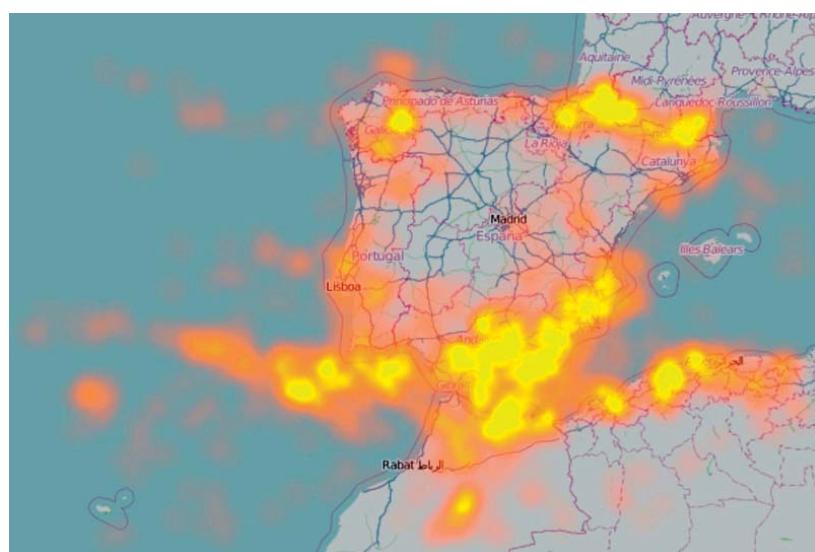
A partir de este momento es cuando podremos representarlas sobre un mapa para crear un heatmap. Explotaremos la base de conocimiento que se ha ido creando para representar en el mapa de calor la distribución geográfica de las incidencias de acuerdo a un código de colores. Este mostrará las zonas de mayor densidad de las incidencias filtradas según los criterios que se busquen (figura 1).



**Figura 1.** Ejemplo de mapa de calor generado

El resultado es un mapa que muestra dónde se han producido las incidencias con mayor frecuencia. Para convertir este en un Mapa de Riesgos, bastará con seleccionar aquellos tipos de incidencia que tienen que ver con aspectos de la infraestructura. Por ejemplo con las instalaciones de seguridad, señalización, puentes, pasos a nivel. Con esta visualización es fácil detectar cuáles serían las instalaciones con más riesgo de sufrir un problema o zonas que acumulan puntos negros.

Existen otras fuentes de datos que se pueden utilizar para generar los mapas de riesgo. Podemos aplicar la misma técnica a determinar las zonas con mayor riesgo de seísmos. Para ello hemos seleccionado de los últimos 10000 terremotos registrados en España, los que han registrado una magnitud mayor a 3 y se han geolocalizado con datos proporcionados a través del Servicio de Información Sísmica [4]. De ellos obtenemos el mapa de riesgos sísmicos en función de los terremotos registrados, que se muestra en la figura 2. A estos se le puede añadir más información relativa a la geología de las diferentes zonas.



**Figura 2.** Mapa de los últimos 10000 seísmos

La combinación de datos procedentes de diferentes fuentes, conforman el conjunto de Mapas de Riesgo. La codificación de las incidencias puede refinarse para asociarlas a cierto elemento de seguridad, tipo de señal o instalación para que se destaque en los mapas resultantes los más afectados por las mismas.

Los mapas resultantes pueden ser generados como gráficos y posteriormente añadidos como una capa más en cualquier Sistema de Información Geográfica (SIG). En el ejemplo mostrado más abajo se ha generado un gráfico georreferenciado, una capa KML y un gráfico que automáticamente añade el mapa de calor sobre una cartografía de base de Open Street Map.

### **3. Métodos de creación del mapa**

Son muchos los métodos que se pueden utilizar para la creación de un heatmap [5]

Para construir un gráfico de este tipo hay que representar las agrupaciones de las incidencias, dando un color diferente para cada densidad. Para ilustrar el resultado se han utilizado varios métodos.

La forma más sencilla de construir un gráfico de este tipo es utilizando la librería numpy de python. Los datos se almacenan en un csv

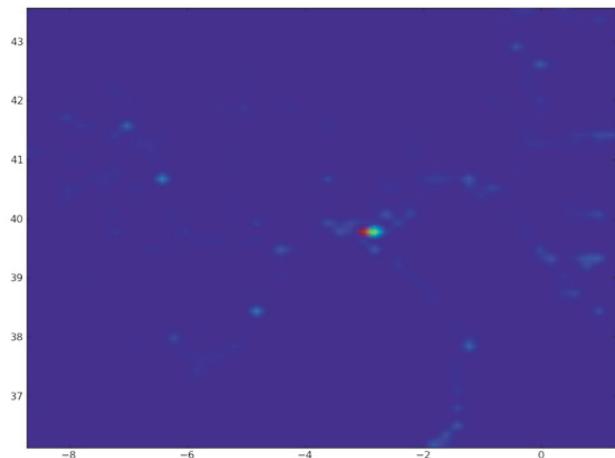
```
#!/usr/bin/python

import numpy as np
import csv
import matplotlib.pyplot as plt

reader = csv.reader(open('datos.csv',
'rb'))
xs = []
ys = []
for index, row in enumerate(reader):
    xs.append(float(row[ 1 ]))
    ys.append(float(row[ 0 ]))

heatmap, xedges, yedges =
np.histogram2d(xs, ys, bins=50)
extent = [ xedges[ 0 ] , xedges[ -1 ] , yedges[ 0 ] , yedges[ -1 ] ]
plt.imshow(heatmap, extent=extent)

plt.show()
```



Esta función no proporciona una imagen georreferenciada, aunque si pueden usarse los ejes X e Y para determinar la posición de las zonas con mayor acumulación de incidencias.

Para conseguir imágenes de gran calidad podemos utilizar la librería heatmap [6]. Esta permite incluirla en un script y generar una imagen en la que se puede controlar el tamaño y escala e colores de las zonas. Esta librería presenta la ventaja de poder generar un fichero en formato KML usando como base el gráfico generado, lo que permite posicionarlo sobre cartografía

```
#!/usr/bin/python

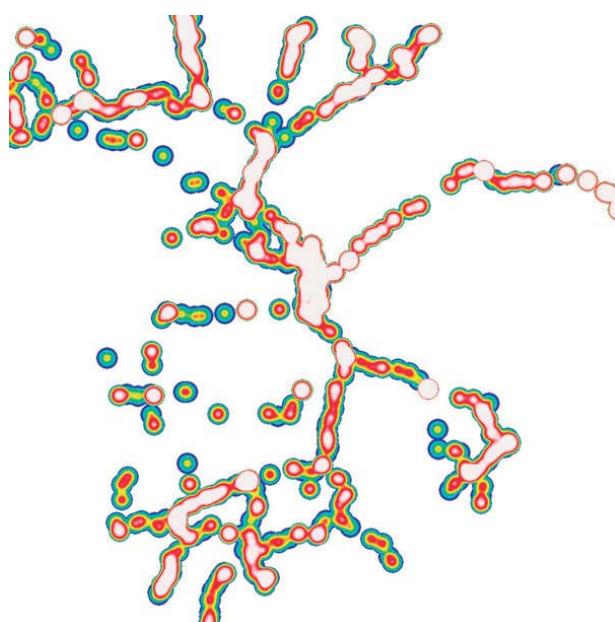
import heatmap
import numpy as np
import csv
import matplotlib.pyplot as plt

hm = heatmap.Heatmap()

reader = csv.reader(open('datos.csv',
'rb'))
dat = []
for index, row in enumerate(reader):
    x = (float(row[ 1 ]))
    y = (float(row[ 0 ]))
    dat.append([x,y])

hm.heatmap(dat, "classic.png", dotsize=50)

hm.saveKML("incidengeorreferenciadas.kml")
```



Por último nos quedaría poder representar el heatmap directamente sobre la cartografía. Para ello podemos utilizar la librería heatmap.py. Partiendo de los datos filtrados mediante SFSQL permite generar un mapa base con Open Street Map y el mapa de calor sobre él.

```
heatmap.py -p datosIncidencias -o riesgos.png --width 1000 --osm -B 0.9
```

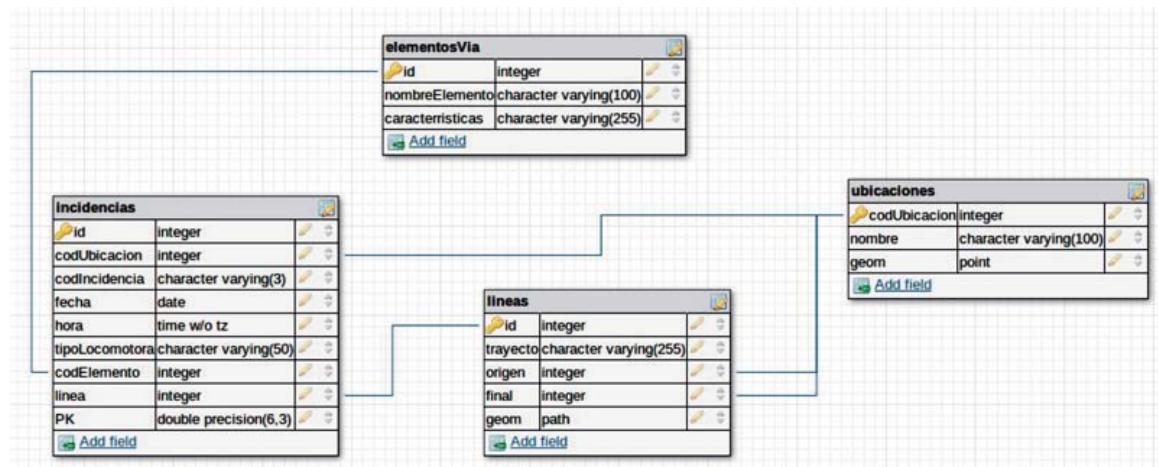


Para permitir un tratamiento más sencillo en la web se puede usar una librería JavaScript, que trate los datos en una aplicación web en el navegador cliente. La más extendida es heatmap.js [7].

En todos los casos podemos cambiar la resolución espacial, el zoom, densidad de puntos o escalas de colores de representación, por lo que nos permite diversos tipos de representación en función de las necesidades

#### 4. Ejemplo práctico

Para nuestro caso práctico hemos elegido una base de datos PostGIS en la que se ha creado el modelo de datos mostrado en la figura 3. Los datos alfanuméricos se muestran a título de ejemplo. Para la tabla de ubicaciones se han elegido objetos de tipo Point para representarlos. Las coordenadas geográficas se han almacenado en EPSG:4258.



**Figura 3.** Modelo de datos

Se han generado incidencias de prueba de diverso tipo para todo un año distribuidas por todas las líneas, hasta un total de 50000, para dar una imagen lo más ilustrativo posible, y se han almacenado de acuerdo al modelo anterior en la base de datos.

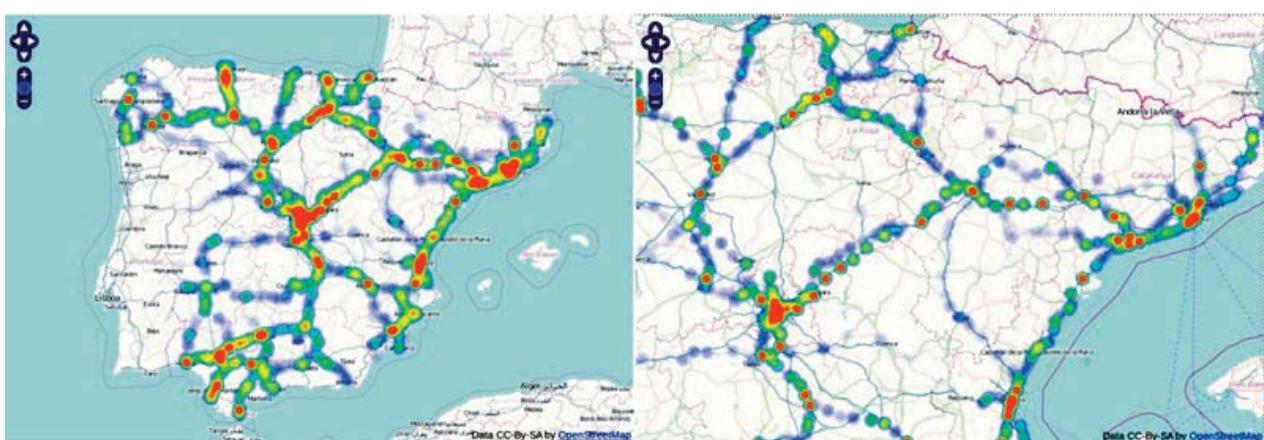
Para poder generar el mapa de calor, se han desarrollado varios programas en Python a medida basándose en los scripts descritos más arriba. A partir de los datos almacenados estos programas proporcionan varias salidas:

- Imágenes del mapa de calor sin georreferenciar
- Imágenes del mapa de calor georreferenciadas en formato KML (figura 4)
- Mapas de calor sobre cartografía de Open Street Map
- Mapas generados dinámicamente mediante JavaScript

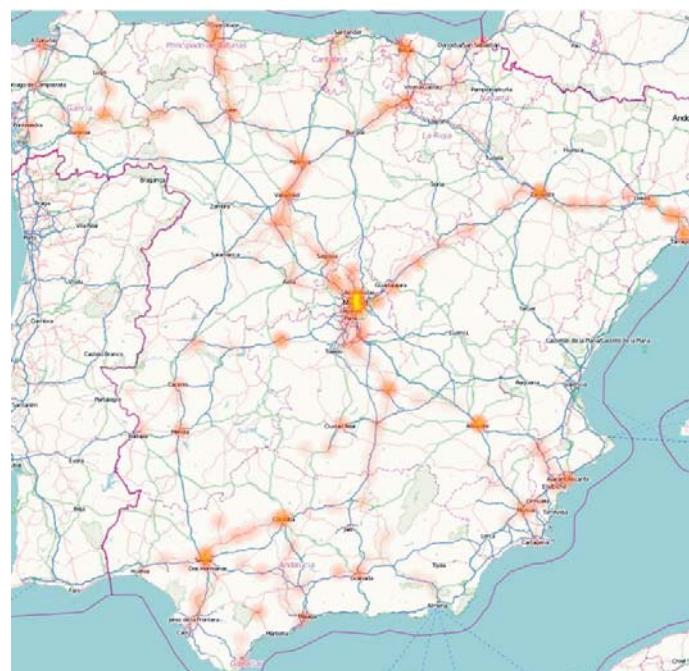
Se ha desarrollado un aplicación web [8] que muestra el resultado completo. Esto permite generar el mapa de riesgos pudiendo filtrarlo por meses y tipología (figura 5). Estos mapas muestran las zonas de riesgo de sufrir un tipo de incidencia determinado.



**Figura 4.** Superposición de capa KML sobre Google Earth



**Figura 5.** Generación dinámica en Aplicación Web



**Figura 6.** Generación dinámica en Aplicación Web

## 5. Conclusión

Los mapas obtenidos a partir de una base de conocimiento de incidencias, pueden utilizarse como Mapas de Riesgo. Estos pueden utilizarse para localizar dónde efectuar medidas preventivas sobre la infraestructura o localizar los puntos negros de la misma. Para identificar las zonas afectadas los mapas deben estar georreferenciados o poderse visualizar directamente con la cartografía. Un ejemplo implementado en una aplicación web puede verse en <http://www.astroide.es/trenes/heatmap.php>

- [1] <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>
- [2] <http://www.boe.es/boe/dias/2010/07/06/pdfs/BOE-A-2010-10707.pdf>
- [3] <http://www.opengeospatial.org/standards/sfs>
- [4] <http://www.ign.es/ign/layout/sismo.do>
- [5] “The History of the Cluster Heat Map”, Leland Wilkinson and Michael Friendly, *The American Statistician*, Noviembre, 2008
- [6] <http://jjguy.com/heatmap/>
- [7] <http://www.patrick-wied.at/static/heatmapjs/>
- [8] <http://www.astroide.es/trenes/heatmap.php>



## Representación de datos meteorológicos en la operación de ferrocarriles. Detección de caídas de rayos

### *Representation of meteorological data in the railways operation. Lightning strikes Detection*

José Gómez Castaño\*

<sup>a</sup> Jefatura de Normalización y Nuevos Desarrollos de la Dirección de Gestión de Red e Innovación. ADIF

<sup>b</sup> Consultor Sistemas de Información Ferroviaria. STRUCTURALIA

#### Resumen

Dentro de las operaciones relacionadas con el ferrocarril, los datos meteorológicos tienen cada vez más aplicación. Tradicionalmente se han desarrollado soluciones basadas en convenios de colaboración entre Empresas Ferroviarias y la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). Con la disponibilidad a través del servidor de datos de la AEMET de nuevos productos, tanto de predicción como de observación, se dispone de fuentes muy fiables con un coste muy reducido y se abre un amplio espectro de posibilidades, complementario a los ya existentes.

En este trabajo se muestra cómo desarrollar un sistema que permiten el uso de los datos de forma automática, desde la captura procedente de los servidores de la AEMET, hasta su publicación y su posterior análisis. Como ejemplo se han utilizado los datos sobre detección de caída de rayos. Todo el sistema se encuentra funcionando y es accesible en la dirección:

<http://www.astroide.es/trenes/rayos.php>

Las herramientas utilizadas han sido elegidas para minimizar el coste, estando compuestas por una base de datos espacial PostGIS, un Servidor Geoserver, todo corriendo sobre un servidor Linux. El desarrollo de las herramientas se ha hecho en lenguaje Java, Python y PHP.

El conjunto de herramientas y procedimientos hace posible a las diferentes empresas relacionadas con el Ferrocarril, tanto públicas como privadas, un mejor aprovechamiento de los datos meteorológicos y una disminución de costes a la hora de planificar sus operaciones.

Palabras clave: GIS, meteorología, rayos.

#### Abstract

*Within the rail related operations, meteorological data are increasingly application. Solutions have traditionally been developed based on cooperation agreements between railway companies and AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). With availability through server AEMET details of new products, both prediction and observation, there are very reliable sources with very low cost. This opens a wide spectrum of possibilities, complementary to existing ones.*

*This paper shows how to develop a system that allows the use of data automatically from capture from AEMET servers until publication. As an example we have used data on lightning detection. <http://www.astroide.es/trenes/rayos.php>*

*The tools used were chosen to minimize the cost, being composed of a spatial database PostGIS, Geoserver a Server, all running on a Linux server. The development of the tools has been done in Java, Python and PHP.*

*The set of tools and procedures enables the various rail related companies, both public and private, better use of meteorological data in planning their operations.*

*keywords: SIG, meteorology, lightning.*

\* [jgomezc@adif.es](mailto:jgomezc@adif.es)

## 1. Introducción

El ejemplo que se ha elegido, el de la detección de rayos, es uno de los tipos de datos proporcionados a través de los servidores de datos de la AEMET. Además de este, actualmente se proporcionan los siguientes:

- Boletines del Sistema Mundial de Telecomunicaciones de la OMM : Datos de observación españoles establecidos como de intercambio mundial por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- Radiación solar : Datos de la red de medida de la radiación en las bandas global, directa, difusa, infrarroja y ultravioleta.
- Ozono : Datos de los sondeos de ozono y de contenido total de ozono de la columna atmosférica.
- Contaminación de fondo : Datos de la red de medida de la contaminación de fondo.
- Radar : Datos de la red de radares y de la composición nacional de los mismos.
- Rayos : Datos de la red de descargas eléctricas.
- Modelos numéricos : Campos numéricos previstos generados por el modelo atmosférico HIRLAM - AEMET.
- Series climatológicas : Series históricas de datos diarios y mensuales, de una amplia selección de observatorios.

La información disponible la podemos dividir en dos tipos en función de la estructura de los mismos:

- Datos alfanuméricos: Compuestos por ficheros txt. Su formato no responde a ningún estándar y su contenido se describe en ficheros proporcionados por la propia AEMET junto a ellos. La periodicidad de publicación es variable en función de la información que publican y los medios para recopilarla.
- Datos binarios: Compuestos por ficheros BUFR y GRIB. Su formato y contenido responde a estándares internacionales. Su publicación está sujeta a los procesos de elaboración de la información que contienen, siendo productos más complejos a los alfanuméricos.

En este artículo abordaremos el tratamiento del primer conjunto, como base de un sistema que se pueda extender al resto de productos. Una aplicación general abarcando ambos tipos será presentada en [1]. La detección de caídas de rayos es un ejemplo de ello. Aunque por sí mismo, es un dato poco relevante para el ferrocarril, puede utilizarse en dos vertientes:

- La posibilidad de estimar la evolución de las celdas de tormenta, junto a datos de radar. Este es otro producto proporcionado por AEMET pero fuera del ámbito de este trabajo.
- El estudio de su impacto en incidencias relacionadas con instalaciones eléctricas. En el trabajo [2], se mostró cómo determinar mediante el uso de “mapas de calor” las zonas con mayor aparición de incidencias relacionadas con una causa. El mismo esquema puede ser aplicado a este tipo de datos para comprobar qué cantidad y dónde se producen, pudiendo actuar de forma preventiva.

A nivel Europeo, existe la iniciativa EUCLID [3] y a nivel mundial en NASA [4] para la detección de estos fenómenos.

## 2. Arquitectura

La arquitectura que se ha implementado está compuesta por el servidor FTP de AEMET que es accesible a través de Internet. El núcleo del sistema reside en el Servidor IDERail, [5] con sistema operativo CentOS, compuesto por un servidor Web Apache donde se publica la información por medio de una aplicación escrita en lenguaje PHP, una vez procesada por las herramientas desarrolladas en lenguaje Python y Java. Para el almacenamiento de los datos persistentes se ha utilizado una base de datos PostgreSQL con las extensiones espaciales PostGIS. Fig 1

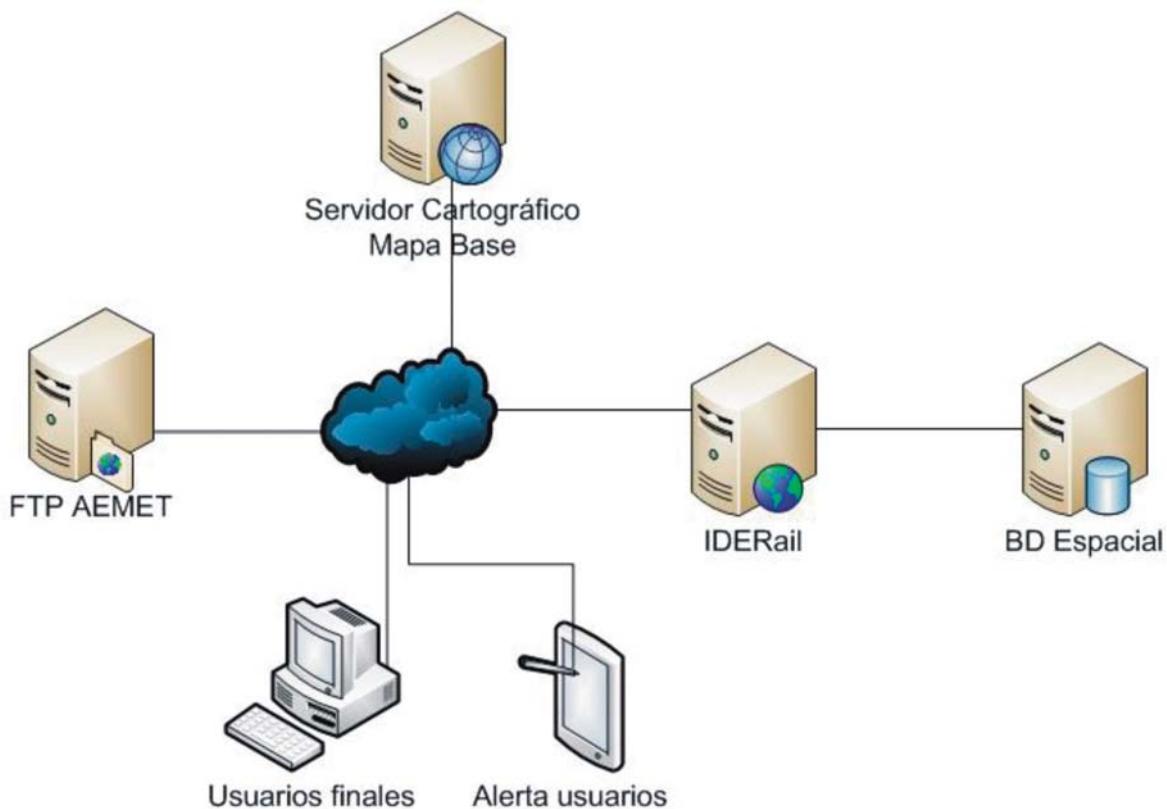


Fig. 1. Arquitectura del sistema

Aunque en el gráfico se encuentra separado, el servidor de Base de Datos espacial, también se ha incluido dentro de IDERail a efectos de optimización de recursos. El servidor cartográfico, proporciona la cartografía base sobre la que se muestran los datos. En este caso de ejemplo se ha elegido utilizar Openstreetmap.

La elección de este diseño responde al objetivo del uso de herramientas con licencias abiertas, ya que los datos también lo son [6]. Esto permite el uso de la solución con una reducción de costes importantes, a la vez que la posibilidad de utilizarlo en diversos entornos.

### **3. Sistema desarrollado**

El sistema se compone de los siguientes módulos independientes:

#### ***Gestión de datos***

En este módulo se han implementado las siguientes tareas:

- Descarga
- Descompresión
- Parseo
- Inserción en la BD

Es el encargado de recopilar los datos y procesarlos de forma que sean utilizables por el módulo de visualización. Está desarrollado en Java. El procedimiento implementado en este servicio es el siguiente:

- Se descarga el fichero correspondiente de pendiente del instante de ejecución. Si no existe el fichero, se genera un mensaje de aviso al administrador del sistema
- Se descomprime el fichero
- Se parsea para producir sentencias SQL que permitan su inserción en el formato adecuado dentro de la base de datos
- Se almacena la información
- Se borran los ficheros temporales

El programa java se ejecuta cada 15 minutos por medio de una tarea CRON dentro del servidor. Esto asegura la gestión dentro del sistema operativo y su integración con la supervisión de otros procesos de forma centralizada. En caso de producirse errores durante la ejecución, se notifica al administrador para la corrección de los mismos.

#### ***Publicación***

Este módulo es el responsable de la publicación de los datos en un formato de visualización integrable con otra información cartográfica. Es el responsable de las siguientes tareas:

- Gestionar peticiones de usuarios
- Visualización del servidor cartográfico
- Generación de salida geoRSS con la información georreferenciada lista para ser consumida por cualquier aplicación cartográfica

Está desarrollado en PHP. Para las capas base sobre las que se muestra la información se ha elegido OpenStreetMap. Su cobertura es muy buena para España y el modo de licenciamiento permite su uso para cualquier necesidad. El procedimiento implementado es el siguiente:

- Página web para la visualización de los datos para una fecha, utilizando el lenguaje PHP y la librería de visualización OpenLayers. La detección de caída corresponde a un instante determinado, produciéndose a lo largo del día una variación debido a la evolución de las celdas de tormenta en las que se encuadra. Por ello, la información permite reflejar esta evolución. Esto se consigue eligiendo ventanas temporales
- Generación de un fichero geoRSS descargable para su uso con otro software geográficos. Este formato es un estándar de OGC [7] y permite cargarlo junto a cualquier otra capa cartográfica para comprobar la evolución de los rayos junto a otras variables.
- Análisis geoespacial. Este permite relacionar los datos meteorológicos con el resto de variables. En este caso se trata de calcular las zonas de riesgo de sufrir el impacto de rayos. En especial se han tomado como referencia las subestaciones eléctricas y las líneas. El sistema permite detectar cuándo los rayos están cayendo a cierta distancia de estas instalaciones y emitir un aviso por correo electrónico a los destinatarios configurados.

#### 4. Formato de Datos

##### **Datos meteorológicos**

Los datos sobre detección de caída de rayos son proporcionados por el servidor FTP de AEMET [8]. La distribución de la zona monitorizada para la Península Ibérica se puede ver en la Fig.2



**Fig. 2.** Área de caída de rayos monitorizada para la península

Los instantes se reflejan en la escala de tiempo UTC, tanto para los datos como para la designación de los ficheros. La información contenida en cada uno de los registros corresponde a las características de la primera descarga entre nube y tierra, que compone el rayo.

En cuanto a los datos proporcionados en cada fichero cada línea de texto corresponde a un registro de observación en formato ASCII, comprimidos en formato GZIP. La información está dividida en campos y viene precedida por un encabezamiento con el siguiente significado:

AA = Año, MM = Mes, DD = Día, HH = Hora, MI = Minuto, SS = Segundo

LAT=Latitud (en grados sexagesimales)

LON= Longitud (en grados sexagesimales) (el signo negativo indica longitud oeste)

(+/-)= Indicador de polaridad de la primera descarga del rayo (positiva o negativa)

STR = Intensidad máxima de la primera descarga del rayo. La unidad es el kiloamperio (KA)

NSE = Número de descargas que componen el rayo

Un ejemplo de estos ficheros es el siguiente:

AA	MM	DD	HH	MI	SS	LAT	LON	(+/-) STR	NSE
2012	9	4	7	34	4	39.5203	4.1460	90.1	1
2012	9	4	7	35	56	40.0177	3.8782	-10.0	1
2012	9	4	7	36	18	39.5030	4.1628	40.6	1

Se almacenan los datos correspondientes a descargas de rayos en los últimos siete días (actual y seis anteriores), actualizándose cada 15 minutos. Para la nomenclatura de los ficheros se usa la siguiente estructura AAAAMMDDHHMM\_descargas.txt.gz, siendo AAAA: año, MM: mes, DD: día, HH: hora, MM: minuto.

Los ficheros se agrupan diariamente en directorios con la estructura AAAA: año, MM: mes, DD: día

De esta forma, tenemos que para el día 4 de septiembre de 2012 se generarían ficheros del tipo 20120904/201209040015\_descargas.txt.gz para el correspondiente a las 00'15 UTC.

## **Datos geográficos**

Otro tipo de información incluida en el sistema es la utilizada para generar la capa base y las que incluyen la situación de las instalaciones ferroviarias de interés. Para el primero, se ha comentado que se ha utilizado OpenStreetMap. [9]

El sistema de análisis espacial requiere que la información se encuentre en una base de datos espacial, en nuestro caso PostGIS. Para cada posición que se necesite controlar, se almacena su latitud y longitud en un campo OGC\_Geom [Referencia OGC] con un tipo de dato Point. La información con la posición de las subestaciones se ha almacenado en este formato.

## 5. Aplicación Resultado

Una vez puesto en marcha todo el sistema tenemos como resultado la visualización de los datos diarios en tiempo real, ya que se ha dicho que la publicación se lleva a cabo por parte de la AEMET cada 15 minutos. De forma predeterminada se muestran los impactos detectados en el día de la fecha. Se puede seleccionar cualquier fecha desde el desplegable. En este sólo aparecen los días en los que se ha detectado algún rayo. Para cada día se puede ver cómo evoluciona mediante el botón “evolución”. Entonces se muestran los impactos detectados en intervalos de 30 minutos. Fig 3



Fig. 3. Aplicación de visualización de los impactos y su evolución

Para ilustrar el sistema de alertas, se ha generado una tabla en la que, para cada día, se muestra la fecha, hora, latitud, longitud, intensidad en KAmperios y Distancia a un punto de referencia en kilómetros. En este ejemplo se ha elegido la estación de Atocha (lon:-3.6894402670, lat:40.4046843680). El resultado de esta distancia es proporcionado por una consulta SFSQL en la base de datos espacial.

Fecha	Lat	Lon	Intensidad (kA)	Distancia (km)
2012-09-08 13:00:06	40.9516	-3.4054	-25.6	69
2012-09-08 13:00:13	41.1369	-3.0880	-8.1	79
2012-09-08 13:00:47	41.3651	-6.4347	-40.9	202
2012-09-08 13:00:47	40.6917	-7.0467	-18.0	217
2012-09-08 13:01:13	38.2773	-2.6203	-24.4	121
2012-09-08 13:01:20	42.7127	-6.1489	-5.4	246
2012-09-08 13:01:23	40.6154	-7.0098	-16.6	215
2012-09-08 13:01:51	40.9496	-3.7000	-20.0	75
2012-09-08 13:02:33	42.2531	1.7261	341.1	288
2012-09-08 13:02:43	42.3773	2.0388	-5.6	305
2012-09-08 13:02:43	42.8681	-4.7662	-4.1	217
2012-09-08 13:02:58	39.7852	-1.5480	-22.3	79
2012-09-08 13:03:11	40.6154	-7.0185	-29.4	215
2012-09-08 13:03:39	41.1504	-3.0684	-39.2	80

Tabla de distancias de los impactos a Atocha

El sistema, una vez puesto en producción evalúa las distancias a cada uno de los puntos de interés y genera las alertas necesarias. También es posible generarlas en función de otros parámetros como la intensidad de los rayos, o filtrarlas para ciertas instalaciones.

Además de la distancia a un punto es posible estimar las distancias a la geometría de vía directamente. Esta se almacena en un campo OGC\_GEOM de tipo linestring. En este caso la consulta SFSQL devuelve la distancia mínima entre el punto de impacto y la perpendicular a la línea que representa la vía. A continuación se muestra un ejemplo de consulta que devuelve la distancia mínima de un punto de caída a una línea que define la geometría de la vía

```
SELECT ST_Distance(ST_GeomFromText('POINT(-72.1235 42.3521)', 4326),  
ST_GeomFromText('LINESTRING(-72.1260 42.45, -72.123 42.1546)', 4326));
```

Este tipo de análisis permite el seguimiento de las descargas y determinar por anticipado , zonas de riesgo.

Por último. Proporciona el resultado en formato geoRSS por medio de una petición GET a la dirección <http://www.astroid.es/trenes/rayosRSS.php> Esta devuelve las posiciones para las caídas detectadas en el día en curso.

## 6. Conclusión

Los datos proporcionados por la AEMET a través de los servidores FTP públicos, son una fuente de información de alta calidad y bajo coste para cualquier empresa que necesite de datos meteorológicos. Utilizando software con licencias abiertas, es posible desarrollar sistemas que adapten estos datos a las necesidades de cada negocio. En el caso del ferroviario, estos se convierten en un complemento de las actividades de producción., integradas en el resto de herramientas. La forma más adecuada de hacerlo es aprovechando la componente espacial que tienen estos datos y que permite visualizarlos con el resto de información ferroviaria.

Para este trabajo se ha implementado un sistema de captura y representación automática de detección de rayos, junto con un procedimiento de análisis espacial y alerta de peligros. Todo el sistema es visible en la dirección:

<http://www.astroide.es/trenes/rayos.php>

## Referencias

- [1] Gómez Castaño, J, 2012 “Representación de información meteorológica a través de una IDE para el uso en Ferrocarriles”, Jornadas Ibéricas de Infraestructuras de Datos Espaciales, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 2012
- [2] Gómez Castaño, José, 2012, “Creación de Mapas de Riesgo Ferroviario a partir de mapas de calor de incidencias”, Vía Libre Técnica
- [3] <http://www.euclid.org/>
- [4] <http://thunder.nsstc.nasa.gov/>
- [5] <http://www.iderail.es>
- [6] [ftp://ftpdatos.aemet.es/rayos/NOTA\\_LEGAL.txt](ftp://ftpdatos.aemet.es/rayos/nota_legal.txt)
- [7] <http://www.opengeospatial.org/pressroom/pressreleases/580>
- [8] <ftp://ftpdatos.aemet.es/rayos/>
- [9] <http://www.openstreetmap.org/>

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

diciembre 2012  
número 5

Desregulación del mercado ferroviario de viajeros

Development and application of energy optimization models in a railway environment: from railway design to ecodriving

Mantenimiento: el reto actual de las modernas infraestructuras y redes ferroviarias en España

Dispositivo Detector de Descarrilamiento y Frenado Automático de Trenes: 3DyFAT

Nuevas prescripciones de estabilización de suelos con cal para rellenos de terraplén en líneas de alta velocidad de ADIF

Influencia del trazado en la calidad geométrica de vías férreas

Fault diagnosis in track circuits based on fuzzy models

Creación de Mapas de Riesgo Ferroviario a partir de mapas de calor de incidencias

Representación de datos meteorológicos en la operación de ferrocarriles. Detección de caídas de rayos



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES