

- **Aplicaciones de apoyo a la explotación implantadas en Puestos de Mando de ferrocarriles**  
*Juan Carlos Enrique Gordillo*
- **La alta velocidad en el desierto: Haramain High Speed Railway Line (HHSRL). Propuesta de medidas ecológicas de defensa de la plataforma de vía frente a la acción del viento**  
*Luis Fort López-Tello*
- **Neoballast: Desarrollando el balasto del futuro**  
*N. Manzo Costanzo, A. López Pita, V. Fontserè, J.A. Casado, I. Carrascal, S. Diego*
- **Propuesta de aplicación de una Red Eléctrica Inteligente "Smart-Grid" a la Red Eléctrica Ferroviaria Española**  
*Israel Herrero Sánchez*
- **Estudio de la calidad de la energía en el sistema eléctrico y su aplicación al sistema ferroviario**  
*Antonio Berrios Villaba*



# vía libre técnica e investigación ferroviaria

## CONSEJO EDITORIAL

### **Rosa Isabel Aza Conejo**

Catedrática Escuela de Ciencias Empresariales,  
Univ. de Oviedo

### **Ignacio Barrón de Angoit**

Director de Viajeros, Unión Internacional de  
Ferrocarriles (UIC)

### **Pedro Casares Hontañón**

Director del Máster de Comercio, Transporte y  
Comunicaciones (Univ. Cantabria)

### **José Vicente Colomer Ferrándiz**

Catedrático de Transportes, UPV (Valencia)

### **Paulo Fonseca Teixeira**

Profesor de Ferrocarriles, IST (Lisboa)

### **Julio Fuentes Losa**

Catedrático de Transporte y Ferrocarril, UNED

### **Ernesto García Vadillo**

Catedrático de Ingeniería Mecánica, UPV/EHU  
(Bilbao)

### **Ricardo Insa Franco**

Profesor Titular de Ferrocarriles, UPV  
(Valencia)

### **Andrés López Pita**

Catedrático de Ferrocarriles, UPC (Barcelona)

### **Jose María Menéndez Martínez**

Catedrático de Ingeniería e Infraestructura del  
Transporte, UCLM

### **Juan José Montero Pascual**

Profesor de Derecho Administrativo, UNED

### **Andrés Monzón de Cáceres**

Catedrático de Transportes, UPM (Madrid)

### **Ignasi Perat Benavides**

Director Máster Sistemas Ferroviarios UPC  
Vilanova

### **Miguel Rodríguez Bugarín**

Catedrático de Ferrocarriles, Univ. A Coruña

### **Antonio Serrano Rodriguez**

Catedrático de Urbanística y Ordenación del  
Territorio UPV (Valencia)

### **Juan Miguel Sánchez García**

Asesor de Logística M. Fomento

### **Jordi Viñolas Prat**

Director Escuelas Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Nebrija

## EDITOR

Antonio Berrios Villalba

## EDITOR ADJUNTO

Ignacio González Franco

Edición digital: José Mariano Rodríguez

Foto portada: José Mariano Rodríguez

## SOBRE LA REVISTA

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

Pretende esta revista tener una utilidad práctica para el sector, cubriendo -al menos parcialmente- el vacío detectado entre las revistas divulgativas y las revistas académicas internacionales indexadas, éstas últimas al alcance de pocas personas y no orientadas (por su propia naturaleza) hacia el sector industrial. Con ello se espera poner a disposición de los actores y ejecutivos del sector la información relevante derivada de los estudios e investigaciones realizadas.

También pretende servir de apoyo a los investigadores españoles, en especial a los jóvenes y a los que desarrollan su actividad en empresas, ofreciéndoles la posibilidad de dar a conocer sus trabajos. Los proyectos de investigación nacionales e internacionales disponen también, con la revista, de una plataforma de diseminación para facilitar la transferencia de resultados a la industria.

La evaluación de los artículos de los números ordinarios corresponde al Consejo Asesor de la revista, que cuentan con el proceso de revisión técnica por pares (review peer) que consolidan la calidad del contenido, de manera justa e imparcial, 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:

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

La revista en formato digital puede ser descargada gratuitamente en:

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

## **Edita:**

Fundación de los Ferrocarriles  
Españoles

ISSN: 2174-0194

Depósito Legal: M-43355-2016



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES

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

# vía libre técnica e investigación ferroviaria

Edita: Fundación de los Ferrocarriles Españoles

## ARTÍCULOS

- Aplicaciones de apoyo a la Explotación implantadas en Puestos de Mando de ferrocarriles.....** **5**  
*Railway applications to help the exploitation of management control traffic centers in railway network*  
 Juan Carlos Enrique Gordillo
- La Alta Velocidad en el desierto: Haramain High Speed Railway Line (HHSRL). Propuesta de Medidas ecológicas de defensa de la Plataforma de vía frente a la acción del viento.....** **31**  
*Measures proposed ecological protection platform track against windblown*  
 Luis Fort López-Tello
- NEOBALLAST: Desarrollando el balasto del futuro.....** **49**  
*NEOBALLAST: Seeking the ballast of the future*  
 N. Manzo Costanzo, A. López Pita, V. Fontserè, J.A. Casado, I. Carrascal, S. Diego
- Propuesta de Aplicación de una Red Eléctrica Inteligente “Smart-Grid” a la Red Eléctrica Ferroviaria Española.....** **63**  
*Application of a Smart Grid to the Spanish Electrical Railway*  
 Israel Herrero Sánchez
- Estudio de la calidad de la energía en el sistema eléctrico y su aplicación al sistema ferroviario .....** **83**  
*Study of the quality power in the electrical system and its scope of applicability to the rail system*  
 Antonio Berrios Villalba



# Aplicaciones de apoyo a la Explotación implantadas en Puestos de Mando de ferrocarriles

## *Railway applications to help the exploitation of management control traffic centers in railway network*

---

*Juan Carlos Enrique Gordillo*

Jefe de Puesto de Mando de ETS / Manager of Control Traffic Centre of ETS

---

### RESUMEN

El presente artículo describe un conjunto de tres aplicaciones independientes implantadas en los Puestos de Mando de la Red Ferroviaria Vasca ETS-RFV, las cuales complementan al resto de aplicaciones presentes en los centros de control.

La primera, llamada Intrages, gestiona todos los aspectos relacionados con los Intervalos de Trabajos y Registros de Seguridad en la Circulación. La segunda se trata de un Libro de Telefonemas informático, que asume el registro de las comunicaciones telefónicas que se registraban en formato de papel. Por último una herramienta de planificación llamada Plaser2010, que cuenta con las funciones necesarias para organizar una planificación completa.

Estas utilidades contribuyen a mejorar la gestión, el registro, la planificación y el control de algunos de los aspectos más importantes diarios en una explotación ferroviaria.

### PALABRAS CLAVE

Intervalos de trabajo, libro de telefonemas, planificación, registros de seguridad, precauciones.

---

<sup>1</sup> jenrique@ets-rfv.eus

---

## **ABSTRACT**

This article describes a set of three separate applications that are running on the Control Traffic Center of Basque Country Railway Network ETS-RFV which complement the rest of applications of control centers. The first, called “Intrages”, manages all aspects in relation to the Work Intervals and Safety Register Book of Traffic.

The second is about the computing telephone message book that assumes the register of phone telecommunications that were registered on a piece of paper. The last one is a planning application called “Plaser2010” that has the necessary functions in order to organize the whole planning.

These tools contribute to improve the management, register, planning and control of some of the most important daily aspects in the railway exploitation.

## **KEY WORDS**

Work intervals, telephone message book, planning, safety register, temporary speed limitation.

## 1. INTRODUCCION

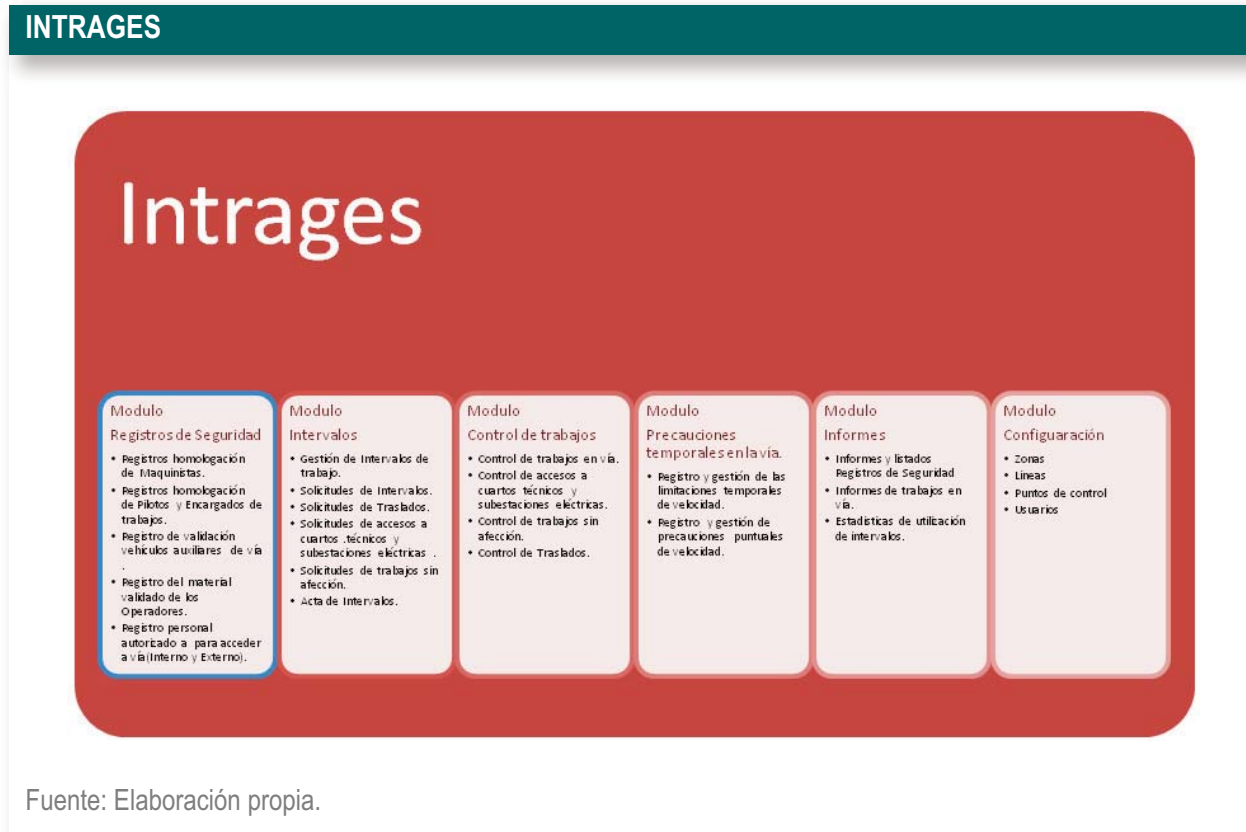
Actualmente las aplicaciones informáticas se encuentran en casi todos los ámbitos de nuestra vida. En el mundo ferroviario prácticamente todas las herramientas de tratamiento de la información que se disponen en la explotación del servicio son realizadas a medida, lo que supone una gran inversión para las empresas y una dependencia absoluta de las empresas suministradoras.

Ante la necesidad de cubrir ciertos aspectos del trabajo y rutina diarios que no estaban automatizados, surgieron varios proyectos que desarrollé con herramientas de programación de software gratuitas, utilizando recursos internos del Departamento de Sistemas Informáticos (carpetas compartidas, SQL Server 2008R) y el apoyo del personal técnico de ETS-RFV.

Estas nuevas herramientas cubren ampliamente estas necesidades y aportan todas las ventajas de la tecnología actual: proveen a los usuarios de una mayor eficacia y comodidad, reducen los tiempos de operación y también los costes de desplazamientos en trabajos habituales en la operativa ferroviaria diaria.

## 2. APLICACIÓN GESTIÓN DE INTERVALOS DE TRABAJO EN VÍA Y REGISTROS DE SEGURIDAD (INTRAGES)

Aplicativo dedicado a la gestión de los Intervalos de trabajos en vía, coordinación de trabajos en vía, registros de seguridad, traslados de vehículos, control de acceso Subestaciones Eléctricas y precauciones en la vía.



En la aplicación están organizados todos los datos que intervienen en uno de los procesos más delicados de una explotación ferroviaria: los trabajos en vía. Se establecen los controles necesarios para evitar y/o minimizar posibles errores de Seguridad, cruzando los datos de los Registros de Seguridad con los datos contenidos en los Intervalos de Trabajo.

Figura 1. Ventana principal de la aplicación INTRAGES

The screenshot displays the main interface of the INTRAGES application. At the top, there is a menu bar with options like 'Aplicación', 'Intervalos', 'Trabajos en vía', 'Informes', 'Registros seguridad', 'Configuración', 'Ayuda', and 'Administrador'. Below the menu is a toolbar with various icons. The main area is divided into two parts: a map on the left and a data table on the right.

The map shows a railway network with various zones labeled, such as ALAYA, ANGLETERA-IBARRODO, RAMAL ABETXURD, BEZKAIA, BILBAO-ERMUJA, RAMAL BERMEO, TXORJERRI, TRANSVI, LUTVANA-SONDOKA, ERMUJA-DONOSTIA, DONOSTIA-HENDAIJA, RAMAL LASRTE ORJA, RAMAL TECNICO ARAISO, and AZPEITIA-LASAO. The map also shows a timeline with dates and times, and a grid of work intervals.

The data table below the map lists active work intervals. The table has columns for 'N.M.', 'EMPRESA', 'DESCRIP.', and 'RECIBI'. The data is as follows:

N.M.	EMPRESA	DESCRIP.	RECIBI
176/2014	TECSA	TRABAJOS DE MANTENIMIENTO DE VIA	
393/2015	ELECHOR	MANTENIMIENTO DE LA LINEA AEREA DE CONTACTO	
308/2012	UTE	DESMONTAJE DE INSTALACIONES Y SUPERESTRUCTURA EN TRAZADO ANTERIOR. TOPOGRAFIA, TRABAJOS EN TUNEL 2.	
518/2014	UTE METRO	MODIFICACION INSTALACIONES. CAVILIZACIONES, REMATES	
547/2015	ELSKOTREN	PRUEBAS TIPO CON ENL 951	
569/2015	SGS	REVISION OCA SUBESTACIONES Y CENTROS DE TRANSFORMACION	
393/2015	ELECHOR	MANTENIMIENTO DE LA LINEA AEREA DE CONTACTO	
732/2012	TECSA	TRABAJOS DE MANTENIMIENTO DE VIA	
12/2014	UTE	COMPROBACIONES TOPOGRAFICAS REMATES.CORTE DE TENSION UNICAMENTE EL VIERNES 13.	
488/2015	INSITEL	TENDIDO DE CABLES DE COMPENSACIONES	
411/2015	SAN IGNACIO	TRABAJOS DE MONTAJE DE INSTALACIONES ELECTRICAS EN LA OBRA DE AMAÑIA	

Below the table, there is a detailed view of a specific work interval. The 'Inf' field is set to 'NO'. The 'Valor' field is set to 'NO'. The 'Linea' is 'DONOSTIA-HENDAIJA'. The 'Estaciones' are 'DONOSTIA - HENDAIJA'. The 'Polo.' is 'PK 0,000 - PK 21,370'. The 'Dias de trabajo' are 'L,M,X,J,V'. The 'Horario' is 'De 23:30 a 05:30'. The 'Encargado' is 'FRANCO MARTIN, JESUS'. The 'Teléfono encargado' is '945 452 240'. The 'Piloto' is 'FRANCO MARTIN, JESUS'. The 'Teléfono piloto' is '945 452 240'. The 'Maquinaria Auxiliar' is 'TIPO=DRESINA - Nº=230925'. The 'Maquinistas' are 'TIPO=PLATAFORMA - Nº=2309016'. The 'Permite Circulación' is 'NO'. The 'Corte de Corriente' is 'SI'. The 'Corte de LMT' is 'NO'. The 'Corte de Sistema C...' is 'NO'. The 'Señalización' is 'BOYAS LUMINOSAS'. The 'Precavución' is 'ARRIAGA, JOSE'. The 'Solicitado por' is 'ARRIAGA, JOSE'. The 'Fecha creación' is '04-ago-2015'. The 'Responsable Empresa' is 'IÑAKI SANTAMARIA If: 659.452.240'. The 'Observaciones' field is empty.

Fuente: Elaboración propia.

## Intervalos de trabajos

Este módulo está dedicado a la gestión de todos los procesos que intervienen en los Intervalos de trabajo, desde la petición de un nuevo intervalo, pasando por la revisión y validación del mismo, hasta la creación final de un acta donde quedan recogidos todos los Intervalos aprobados por la Comisión de Intervalos.

La Comisión de Intervalos está compuesta por un responsable de Circulación que es además el gestor de Intervalos, un responsable de Seguridad en la Circulación, estos últimos se responsabilizan de que las solicitudes cumplen con Reglamento de Circulación y que respetan las diferentes normas de Seguridad en la Circulación. También acuden a la Comisión diferentes responsables de los departamentos de Instalaciones, Construcción, Mantenimiento y/o Proyectos en representación de los solicitantes de Intervalos, esta reunión tiene carácter semanal.



El formulario de solicitud dispone de todos los campos necesarios y requeridos en un Intervalo de trabajo. Una de las ventajas reside en que los campos que requieren personal capacitado, material auxiliar de vía validado, maquinistas habilitados, corte de tensión de catenaria, corte de línea de media tensión o corte del sistema de comunicaciones, son datos que se cotejan con el módulo de Registros de Seguridad de la misma aplicación, consiguiendo de esta manera un control adicional y asegurando que los datos incluidos en el Intervalo cumplan en todo momento las normativas de Seguridad vigentes.

Figura 2. Formulario Solicitud Intervalo

Solicitud Intervalo

Semana: 47 del 16-11-2015 al 22-11-2015

Numero Intervalo: [ ]

Actividad/Lugar

Empresa

Dias/Horarios

Piloto/Encargado

Maquinistas

Material Rodante

Condiciones

Tipo de Responsable

Piloto

Encargado Trabajos  A Confirmar

Encargado de Pruebas

Listados

Ajenos

ETS

Empresas: ELECNOR, SA

Encargado: [ ] \*

EA:  Puede realizar C.C. y LMT (Sólo en Líneas de Tranvía)

EC:  Puede realizar C.C. y LMT (En Ferrocarril y Tranvía)

Telefono: 666111111 \*

SECC:  Puede realizar SECCIONADORES

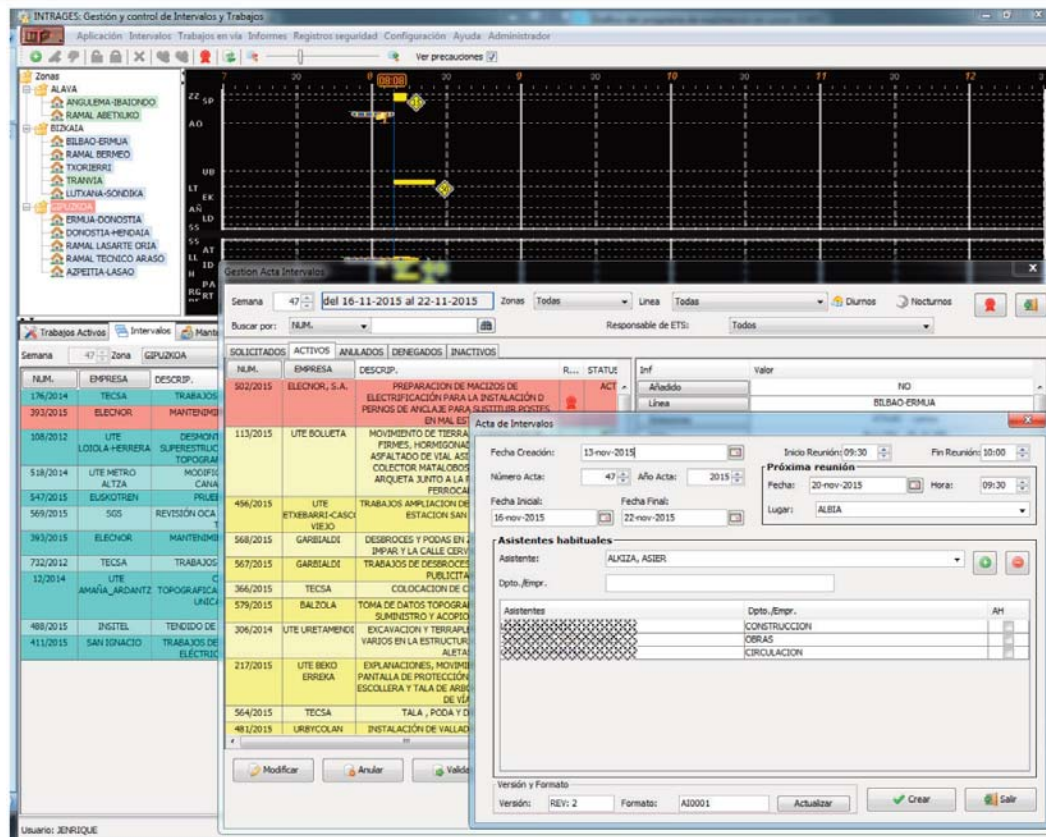
\* Campos obligatorios

Fuente: Elaboración propia.

Una vez solicitado el Intervalo por Mantenimiento, Instalaciones, Construcción o Circulación, éste es validado por el responsable o gestor de Intervalos pasando a estar activo en el sistema y disponible en los Puestos de Mando.

El conjunto de Intervalos que se han validado se publican en un Acta de Intervalos en formato Excel o PDF con todos los intervalos clasificados por zonas y diurnos/nocturnos para su distribución a todos los interesados.

Figura 3. Diálogos de gestión del Acta de Intervalos



Fuente: Elaboración propia.

El módulo de Intervalos de trabajos también permite solicitar y registrar trabajos sin afección a la circulación; trabajos que, por su naturaleza no necesitan de personal capacitado ni de condiciones especiales de seguridad y que, sin embargo, es necesario que estén solicitados y autorizados para poder trabajar en las instalaciones. Recogiendo los datos básicos de contacto se vigila que todo contratista que trabaje en las instalaciones esté debidamente autorizado. Estos trabajos también aparecen en el Acta.

### Trabajos en vía

Otro de los módulos es el de trabajos en vía, que permite al personal de circulación de los Puestos de Mando registrar un trabajo, siempre y cuando esté recogido en el acta de Intervalos activos, validos para la semana en curso.

Cuando el responsable o encargado de un trabajo recogido en el Acta llama al Puesto de Mando solicitando permiso para entrar a trabajar en la vía, el supervisor de circulación comprueba que está registrado en le aplicación INTRAGES y verifica que todas las informaciones que suministra el responsable del tajo (datos del trabajo, ubicación, piloto/encargado, maquinistas, material auxiliar y condiciones especiales) se corresponden con los del registro del Intervalo.

Una vez cotejados los datos, el supervisor de circulación registra el trabajo en la aplicación y aparece disponible para todo aquel que tiene acceso a la misma. Este proceso impide el solapamiento de

trabajos en la misma zona. Los trabajos activos son visualizados en la aplicación de dos formas, la primera en formato tabla, ordenada por líneas y puntos kilométricos, la segunda de manera gráfica en una malla (espacio/tiempo) que muestra la situación e información en tiempo real de los trabajos.

Figura 4. Formulario Inicio de trabajo en vía

Fuente: Elaboración propia.

## Registros de Seguridad

El módulo de Registros de Seguridad está gestionado por el departamento de Seguridad en la Circulación, el cual se encarga de mantener actualizadas todas las acreditaciones y validaciones de los diferentes registros soportados. Estos registros están disponibles para el resto de usuarios sólo como lectura. También se dispone de la posibilidad de exportar las listas a formato Excel y PDF.

Los registros incluidos son de tres tipos:

**Materiales:** en él se registran los vehículos autorizados a circular por la red de ETS-RFV. Existen dos tipos de materiales recogidos en los registros: el material auxiliar de vía y el material de los operadores.

**Responsables:** entre los cuatro tipos de registros de responsables están los encargados y pilotos autorizados, los maquinistas, el personal de ETS-RFV validado y los encargados de pruebas.

**Personal de acceso a vía:** hay tres tipos de registros diferentes: personal de ETS-RFV, personal ajeno y personal operadores.

Figura 5. Ejemplo de registro de Pilotos y Encargados de Trabajo

NOMBRE	APELLIDOS	EMPRESA	DNI	DESDE	HASTA	CARGO	EA	EC	SECC
				08-oct-2014	08-oct-2017	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				14-ene-2015	14-ene-2018	PILOTO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				22-jun-2015	22-jun-2018	ENCARGADO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				22-jun-2015	22-jun-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				22-jun-2015	22-jun-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				30-jul-2015	30-jul-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				16-oct-2012	16-oct-2015	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				22-oct-2015	22-oct-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				22-oct-2015	22-oct-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				16-oct-2012	16-oct-2015	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				03-oct-2014	03-oct-2017	PILOTO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				29-oct-2013	29-oct-2016	PILOTO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				24-mar-2015	24-mar-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				21-abr-2015	21-abr-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				16-oct-2015	16-oct-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				16-oct-2015	16-oct-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				20-oct-2014	20-oct-2017	PILOTO	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				03-may-2013	03-may-2016	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				28-ene-2015	28-ene-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				24-sep-2013	24-sep-2016	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				09-jul-2015	09-jul-2018	ENCARGADO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Formulario Gestión de Precauciones en vía

TRAMO	V.MAX	MOTIVO	FECHA EST...	ESTABL. POR	VIAS	EUROLOOP	SEÑAL MER.
BOLUETA - Etrebarri 3,690 - 3,999	55	GEOMETRÍA DE LA VÍA	19/oct/2013		TODAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Malaga - Karakate 51,912 - 52,012	30	DESPRENDIMIENTO DE ROCAS EN BOCA ENTRADA TUNEL DE YARAKATE	02/mar/2015		TODAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mendaro - Deba 63,720 - 63,820	30	INESTABILIDAD DEL TALUD	24/nov/2014		TODAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Deba - Arroa 69,700 - 69,900	50	DESPRENDIMIENTO DE PIEDRAS Y GUNITA DE BOVEDA	07/mar/2007		TODAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zunala - Zarautz 66,336 - 66,564	15 Solo Mercancia	VIBRACIONES VIA	10/abr/2000		TODAS	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Usurbil - Lasarte 99,400 - 99,500	50	INESTABILIDAD EN PLATAFORMA DE VIA	26/nov/2013		TODAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ANOETA - INTXAURRONDO 2,890 - 2,979	20	GEOMETRÍA DE VIA POR OBRAS NUEVA ESTACION LOIOLA	04/jul/2015		TODAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ANOETA - INTXAURRONDO 3,145 - 3,210	30	GEOMETRÍA DE VIA - OBRAS NUEVA ESTACION DE LOIOLA	04/jul/2015		PAR	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ANOETA - INTXAURRONDO 3,210 - 3,284	20	GEOMETRÍA DE VIA - OBRAS NUEVA ESTACION DE LOIOLA	04/jul/2015		TODAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
HEREDIA - PASAJA 5,779 - 5,819	30	GEOMETRÍA DE VIA POR TRABAJOS CONEXION ALTA	05/sep/2015		TODAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fuente: Elaboración propia.

## Precauciones en la vía

Este módulo regula todas las limitaciones temporales de velocidad que existen en la Red de ETS-RFV.

Están clasificadas en dos tipos:

**Temporales:** aquellas precauciones que por su carácter son de media o larga duración y tienen que ser publicadas para el conocimiento general.

**Por telefonema:** aquellas que su duración es inferior a 24 horas y son transmitidas a la línea, directamente a los maquinistas, por telefonema, son registradas en este módulo para control e información estadística.

## Traslados

Módulo dedicado a la tarea de gestionar el movimiento del material rodante tanto nocturno como diurno y de consumo interno en la Red ETS-RFV, generalmente para situar los vehículos en el entorno de la zona de afección de un intervalo de trabajo.

Figura 7. Formulario Solicitud Traslado

The screenshot shows the 'Gestión traslados' application window. At the top, there are filters for 'Desde:' (01-sep-2015), 'Hasta:' (18-dic-2015), 'Zona:' (ALAVA), and 'Linea:' (BILBAO-ERMUA). Below these are tabs for 'Solicitados', 'Activos', 'Denegados', and 'Realizados'. A table lists various transfer requests with columns for 'FECHA', 'TRAMO', and 'MOTIVO'. A modal window titled 'Solicitud Traslado Material' is open, showing a 'Material Rodante' section with radio buttons for 'Material Aux. Val.' (selected) and 'Operadores'. The 'Material' dropdown is set to 'BALZOLA | PERFILADORA | MVP-PE-01'. A red warning message reads: 'USO RESTRINGIDO POR GALIBO. DEBE CIRCULAR CON AG. ACOMPAÑAMIENTO'. Below this is a table with columns 'Empresa', 'Tipo', 'Numeración', and 'Material', containing rows for 'BALZOLA BATEADORA MVP-BA-02 AUXILIAR' and 'BALZOLA PERFILADORA MVP-PE-01 AUXILIAR'. At the bottom of the modal, there are buttons for 'Validar', 'Denegar', 'Modificar', 'Eliminar', and 'Nuevo'. A red warning message at the bottom of the main window repeats: 'Hora limite de salida desde el origen las 23:30, posterior el traslado será denegado.'

Fuente: Elaboración propia.

## Autorizaciones de acceso a Cuartos Técnicos y Subestaciones Eléctricas

Debido a la gran cantidad de locales que dispone ETS-RFV a lo largo de todas las líneas, sin más supervisión que el CCTV y conectados al sistema de alarmas anti-intrusión, es necesario tener conocimiento de las personas o empresas que tienen que visitar un determinado local en una fecha establecida.

Cualquier responsable de ETS-RFV que envíe a personal ajeno a un local, en el cual solo se dispone de la supervisión de las cámaras y los sistemas anti-intrusión, deberá registrar la autorización en la aplicación para control de los Vigilantes de Seguridad del Puesto de Mando.

Figura 8. Gestión de accesos C.T. y Subestaciones Eléctricas

FECHAS	HORA ENTRADA	HORA SALIDA	UBICACION CT O SE	EMPRESA	RESPONSABLE EMPRESA	TELEFONO CONTACTO	RESPONSABLE ETS	TRABAJO	
16-feb-2015 al 31-jul-2015	08:00	05:00	GINTXURIZKETA, I.BENTAK	SIEMENS RAIL				MODIFICACION EN INSTALACIONES DE SEÑALIZACION	AF
13-abr-2015 al 08-jun-2015	08:00	04:00	LUTIANA	ELECTRANS				MODIFICACIONES SEÑALIZACION	Fra
13-abr-2015 al 08-jun-2015	08:00	04:00	LUTIANA	THALES				MODIFICACIONES EN SEÑALIZACION	Fra
13-abr-2015 al 08-jun-2015	08:00	04:00	SONDIKA	ELECTRANS				MODIFICACIONES EN SEÑALIZACION	Fra
15-jun-2015 al 16-jun-2015	23:00	05:00	ESTACION DE LOIOLA	ELDU				MONTAJE DE PROTECCION Y CONEXION DE LINEA PARA ALIMENTACION DE LA ESTACION PROVISIONAL DE LOIOLA	
15-jul-2015 al 24-jul-2015	08:00	19:00	ATXURI, ZUMAIA, AMARA, PORTOMOKO	REVENGA				CONECTORIZACIONES DE FIBRA Y TRABAJOS EN NODOS SDH	AF
17-ago-2015 al	08:00	07:59	ESTACION DE LOIOLA	ELDU				MONTAJE DE ACOMETIDA ELECTRICA DEFINITIVA	

Estado: **TODOS** Fecha Inicial: 14-may-2015 Fecha Final: 14-nov-2015

Legend: Solicitado (light blue), Autorizado (green), Denegado (yellow)

Fuente: Elaboración propia.

## Informes y consultas

La aplicación dispone de varios informes de situación y estadísticas de uso, tanto en pantalla como en formato de papel.

Es posible realizar consultas con diferentes filtros de prácticamente todas las operaciones que se realizan en la aplicación.

Figura 9. Formulario consulta de trabajos realizados

INTERVALO	EMPRESA	UBICACIÓN	P.K.	TI
306/2014	UTE URETAMENDI	Mallabia-ERMUA (SE1R)	42,450 - 42,600	
456/2015	UTE ETXEBARRI-CASCO	BOLUETA-Etxebarri	2,155 - 4,761	
502/2015	ELECNOR, S.A.	Ariz-Lemoa	7,700 - 7,800	
MANT.	ELECTRANS	Zaldibar-Zaldibar	39,040 - 39,040	
306/2014	UTE URETAMENDI	Mallabia-ERMUA (SE1R)	42,450 - 42,600	
MANT.	ZAMAKOIA	Ariz-Ariz	5,885 - 5,885	
MANT.	TECUNI	ATXURI-BOLUETA	0,000 - 2,155	
14/2015	ELECNOR, S.A.	Ariz-Usansolo	5,885 - 11,513	
475/2015	CYCASA	Zumaia-Zarautz	81,550 - 81,650	
539/2015	ELECTRANS S.A.	Zarautz-Zarautz	88,250 - 88,350	
MANT.	ETS	Mendaro-Mendaro	60,403 - 60,403	
MANT.	FONTANERIA PIZARRO	DONOSTIA-DONOSTIA	107,777 - 107,777	
475/2015	CYCASA	Zumaia-Zarautz	81,550 - 81,650	
539/2015	ELECTRANS S.A.	Zarautz-Aia-Orio	88,350 - 88,450	
393/2015	ELECNOR	Usurbil-Lasarte	98,127 - 100,701	
732/2012	TECSA	Aia-Orio-Usurbil	90,255 - 98,127	
563/2015	ELECTRANS S.A.	GERNIKA-San Kristobal	14,503 - 21,342	
563/2015	ELECTRANS S.A.	GERNIKA-San Kristobal	17,318 - 17,318	
576/2015	EUSKALTEL	DERIO-Zamudio	10,000 - 10,100	
576/2015	EUSKALTEL	DERIO-Zamudio	8,500 - 8,500	
MANT.	THALES	La Ola-SONDIKA	4,724 - 5,224	

Información	Valor
Fecha Inicio	17/noviembre/2015
Hora de Inicio	07:55
Fecha de Fin	17/noviembre/2015
Hora de Fin	12:55
Tramo	Mallabia - ERMUA (SE1R)
Pks.	42,450 - 42,600
Piloto/Encargado	
Teléfono	
Maquinista	
Material Rodante	
Corte de Tensión	NO
Corte de LMT	NO
Corte de Sistema C...	NO
Permite Circulación	SI
Vias de Trabajo	UNICA
Descripción Actividad	EXCAVACION Y TERRAPLENADO, TRABAJOS VARIOS EN LA ESTRUCTURA E/A 2, MURO 2,1 Y ALETAS
Observaciones	UTE URETAMENDI Y UTE BEKO ERREKA PODRÁN COMENZAR LOS TRABAJOS A LAS 8.00H CON LA CONDICIÓN DE QUE ENTRE 8.00 Y 9.00 SOLO SI SE TRABAJA EN UNO DE LOS TAJOS.

Zona: Todas    Línea: Todas    Estado: SOLO FECHAS

Desde el: 17-nov-2015 a las 07:00 hasta el 18-nov-2015 a las 06:59    Busqueda: COMPLETA

Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Estadísticas de uso de los Intervalos

INTERVALO	EMPRESA	UBICACIÓN	P.K.	TI
306/2014	UTE URETAMENDI	Mallabia-ERMUA (SE1R)	42,450 - 42,600	
456/2015	UTE ETXEBARRI-CASCO	BOLUETA-Etxebarri	2,155 - 4,761	
502/2015	ELECNOR, S.A.	Ariz-Lemoa	7,700 - 7,800	
MANT.	ELECTRANS	Zaldibar-Zaldibar	39,040 - 39,040	
306/2014	UTE URETAMENDI	Mallabia-ERMUA (SE1R)	42,450 - 42,600	
MANT.	ZAMAKOIA	Ariz-Ariz	5,885 - 5,885	
MANT.	TECUNI	ATXURI-BOLUETA	0,000 - 2,155	
14/2015	ELECNOR, S.A.	Ariz-Usansolo	5,885 - 11,513	
475/2015	CYCASA	Zumaia-Zarautz	81,550 - 81,650	
539/2015	ELECTRANS S.A.	Zarautz-Zarautz	88,250 - 88,350	
MANT.	ETS	Mendaro-Mendaro	60,403 - 60,403	
MANT.	FONTANERIA PIZARRO	DONOSTIA-DONOSTIA	107,777 - 107,777	
475/2015	CYCASA	Zumaia-Zarautz	81,550 - 81,650	
539/2015	ELECTRANS S.A.	Zarautz-Aia-Orio	88,350 - 88,450	
393/2015	ELECNOR	Usurbil-Lasarte	98,127 - 100,701	
732/2012	TECSA	Aia-Orio-Usurbil	90,255 - 98,127	
563/2015	ELECTRANS S.A.	GERNIKA-San Kristobal	14,503 - 21,342	
563/2015	ELECTRANS S.A.	GERNIKA-San Kristobal	17,318 - 17,318	
576/2015	EUSKALTEL	DERIO-Zamudio	10,000 - 10,100	
576/2015	EUSKALTEL	DERIO-Zamudio	8,500 - 8,500	
MANT.	THALES	La Ola-SONDIKA	4,724 - 5,224	

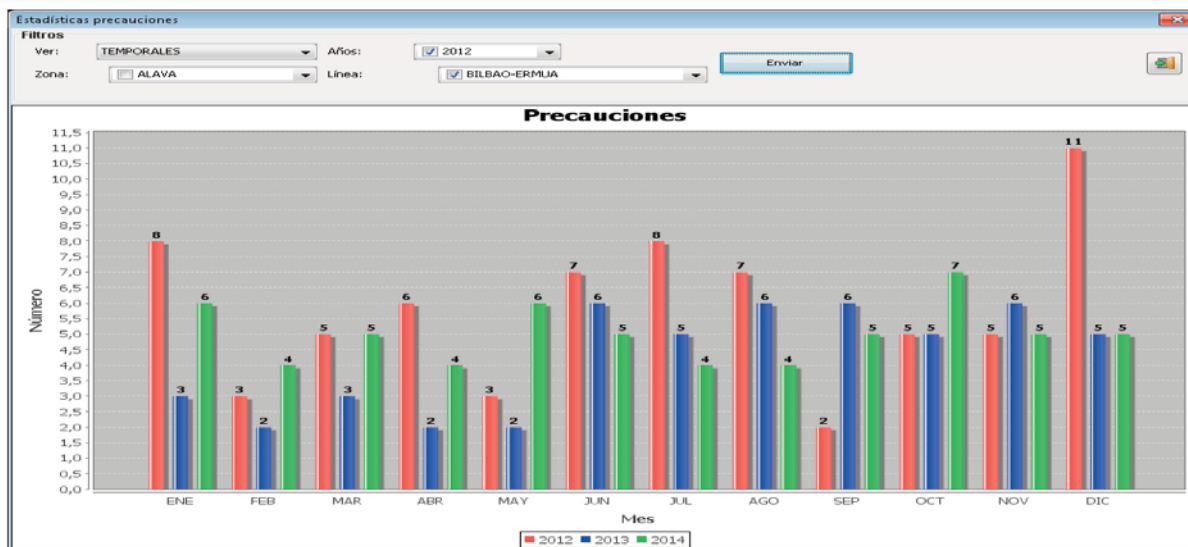
Información	Valor
Fecha Inicio	17/noviembre/2015
Hora de Inicio	07:55
Fecha de Fin	17/noviembre/2015
Hora de Fin	12:55
Tramo	Mallabia - ERMUA (SE1R)
Pks.	42,450 - 42,600
Piloto/Encargado	
Teléfono	
Maquinista	
Material Rodante	
Corte de Tensión	NO
Corte de LMT	NO
Corte de Sistema C...	NO
Permite Circulación	SI
Vias de Trabajo	UNICA
Descripción Actividad	EXCAVACION Y TERRAPLENADO, TRABAJOS VARIOS EN LA ESTRUCTURA E/A 2, MURO 2,1 Y ALETAS
Observaciones	UTE URETAMENDI Y UTE BEKO ERREKA PODRÁN COMENZAR LOS TRABAJOS A LAS 8.00H CON LA CONDICIÓN DE QUE ENTRE 8.00 Y 9.00 SOLO SI SE TRABAJA EN UNO DE LOS TAJOS.

Zona: Todas    Línea: Todas    Estado: SOLO FECHAS

Desde el: 17-nov-2015 a las 07:00 hasta el 18-nov-2015 a las 06:59    Busqueda: COMPLETA

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Estadísticas precauciones



Fuente: Elaboración propia.

### Conclusión de la aplicación Intrages

Al ser una aplicación desarrollada en Java con un fichero ejecutable “jar” instalado en una carpeta compartida de red y una conexión a una base de datos SQL Server 2008R, su distribución e instalación es muy sencilla, puesto que no necesita grandes requerimientos técnicos ni físicos.

Todas las zonas, líneas, puntos de control, usuarios, etc. son configurables desde la propia aplicación con un módulo de configuración del sistema, lo que permite la expansión a la par del crecimiento de la Red Ferroviaria y proporciona flexibilidad y escalabilidad. Además de disponer de un interfaz amable, agradable a la vista y de fácil manejo para el usuario, tiene capacidad para reaccionar y adaptarse sin perder calidad; maneja el crecimiento continuo de trabajo de manera fluida y está preparada para ampliarse sin perder calidad en los servicios ofrecidos.

La aplicación no necesita cambios para adaptarse a cualquier tipo de infraestructura ferroviaria, proporcionando una herramienta ágil, imprescindible, accesible y económica.

### 3. APLICACIÓN LIBRO DE TELEFONEMAS INFORMÁTICO

En el ferrocarril una de las mayores preocupaciones siempre ha estado en el registro de las comunicaciones telefónicas y los telefonemas de circulación. El medio utilizado y que en la actualidad se sigue usando para el registro es el Libro de Telefonemas.

Todo aquel que pertenece al ámbito del ferrocarril conoce el uso que se da a este libro, pero para los profanos en el tema, la misión de este libro consiste en registrar órdenes, textos, instrucciones, etc. transmitidos telefónicamente entre dos interlocutores, numerando cada texto con un número del emisor y otro del receptor y cada interlocutor en su libro de registro.

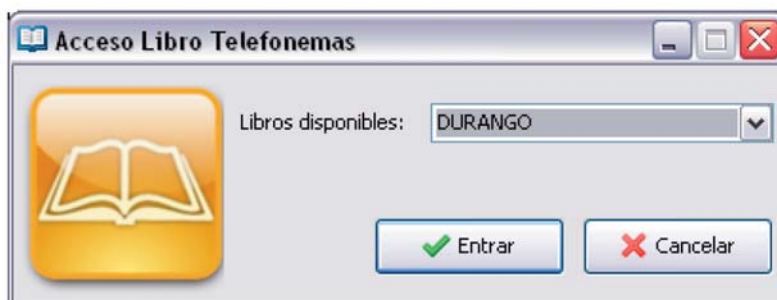


Una primera versión del Libro de Telefonemas Informático, se desarrolló para funcionar en un ordenador de manera local y sin conexión a la red. Así, todas las actualizaciones había que realizarlas en el equipo local lo que requería de muchos desplazamientos para mantener el sistema actualizado. A pesar de ello esta aplicación fue todo un logro en el año 2002 y funcionó sin problemas hasta ser sustituida por la nueva versión. Este nuevo formato de Libro de Telefonemas está normalizado internamente mediante su correspondiente consigna escrita de funcionamiento y de obligado cumplimiento.

En la versión actual del Libro de Telefonemas, con todos los locales ETS-RFV conectados con red de comunicaciones, se ha desarrollado la aplicación conectada a una sola base de datos alojada en los servidores centrales de ETS-RFV. Esta nueva arquitectura permite que cualquier actualización de la aplicación sea cargada de forma instantánea en los equipos locales y que la modificación o ampliación de Textos predefinidos en el Libro esté disponible de inmediato para todos los usuarios. De esta manera, se logra un sistema vivo y dinámico y se elimina cualquier desplazamiento tanto para actualizaciones como para inspecciones o auditorías.

La aplicación puede disponer de tantos Libros de Telefonemas como se desee. El usuario al entrar en la aplicación debe elegir el libro que necesita utilizar. También es posible asignar un solo libro a un grupo de usuarios. Un mismo Libro de Telefonemas puede ser utilizado por múltiples usuarios simultáneamente. Los usuarios son dados de alta en el sistema con los permisos que necesiten y es la aplicación la encarga de identificar al usuario por medido del inicio de sesión en Windows, asignándole los Libros de Telefonemas que puede usar. En caso de avería de los sistemas informáticos o de fallos en las comunicaciones que impidan el registro de los textos, se procede al uso del Libro de Telefonemas en formato de papel hasta el restablecimiento de la incidencia.

Figura 12. Acceso libro de Telefonemas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Ventana Principal

Libro Telefonemas: [DURANGO] - USUARIO: [JENRI]

Idioma: CASTELLANO | Tipo Telefonema: ANULACION DE PETICION DE RETROCESO | Numero Reglamento: [ ]

Telefonemas disponibles: Anulo petición de retroceso que hice por telefonema núm. [ ], Solicito autorización para reanudar la marcha [ ]

Ver: Todos | Buscar por: Num. Expedido [ ]

Fecha Hora	Num. Expedido	Num. Recibido	Estación Comunicada	Telefonema
11/12/2009 13:34:25	3	6	P.M. ATXURI	SOLICITO CORTE DE TENSION ENTRE DEBA Y MENDARO .
11/12/2009 13:31:45	2	4	P.M. ATXURI	CONCEDIDO INTERVALO ENTRE MENDARO Y DEBA POR VIA UNICA HASTA LAS 13:31 APARTANDOSE EN MENDARO .
11/12/2009 13:30:16	1	3	P.M. ATXURI	SOLICITO INTERVALO ENTRE DEBA Y MENDARO POR VIA UNICA HASTA LAS 13:29 PARA APARTARSE EN MENDARO .

Fuente: Elaboración propia.

## Telefonemas

Los telefonemas están organizados en primer lugar por el Idioma, en este caso se dispone del castellano y el euskera. A continuación y siguiendo la clasificación del Reglamento de Circulación, se ordenan por Tipo de Telefonema. Una vez elegido el tipo, se rellena la lista de Telefonemas disponibles para su uso. También es posible elegir por el número asignado a un telefonema en el Reglamento de Circulación.

Figura 14. Formulario creación de telefonema

Telefonema

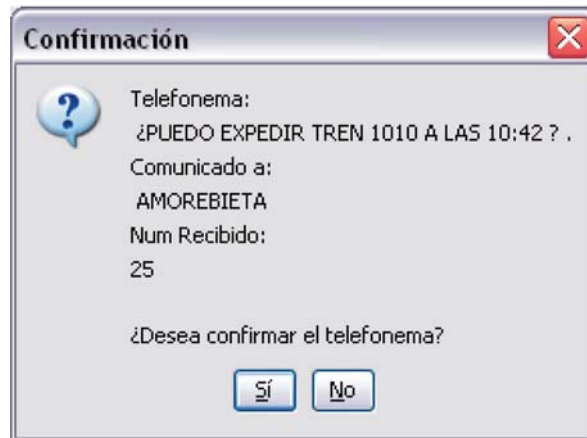
SERIE: ¿Puedo expedir tren 1010 | HORA: a las 10:42 ?

Numero Expedido: 4 | Numero Recibido: 25 | Hora: 10:47:38 | Estación Comunicada: AMOREBIETA

Aceptar | Cancelar

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Diálogo confirmación Telefonema



Fuente: Elaboración propia.

Existen cuatro botones en la barra de herramientas para la redacción de Telefonemas Genéricos o Texto Libre de Precauciones, Energía, Novedades y Libre:

**Precauciones:** Se utiliza para anotar cualquier tipo de precaución comunicada, así como para anularla. El Telefonema se sombreadá de color Naranja.

**Energía:** Se utiliza para registrar todos los telefonemas relacionados con seccionadores, centrales o energía. El Telefonema se sombreadá de color Rojo.

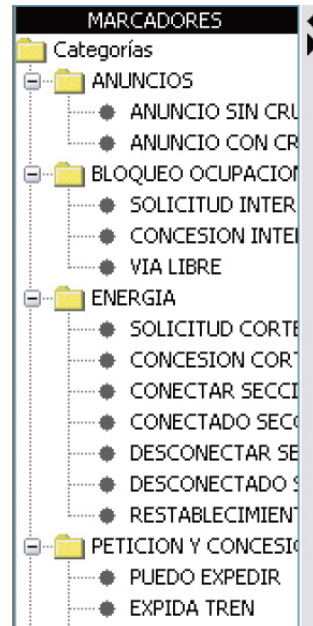
**Novedades:** Se utiliza para la transmisión de novedades de un relevo al siguiente. El Telefonema se sombreadá de color Azul.

**Texto Libre:** Se utiliza para la transmision de telefonemas no recogidos con ninguna de las anteriores opciones o no esten incluidos en el reglamento.

### Marcadores o Favoritos

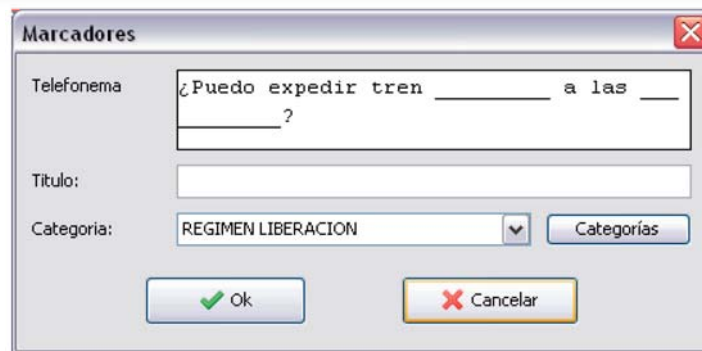
Para facilitar el uso del Libro de Telefonemas se dispone de una función, que permite crear marcadores con los telefonemas más usados y organizados por categorías. La distribución de los mismos es personalizada e individual para el usuario que los crea y está disponible en cualquier ordenador de la red.

Figura 16. Árbol de Favoritos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Diálogo creación de favoritos o marcadores



Fuente: Elaboración propia.

## Categorías

Se pueden crear categorías si no existe la deseada y también modificarlas o eliminarlas. La eliminación de una categoría implica la eliminación de los marcadores asociados a dicha categoría.

Figura 18. Dialogo creación Categorías



Fuente: Elaboración propia.

### Funciones especiales de copiar y repetir

Es posible “copiar” un telefonema que ya está transmitido, permitiendo que los campos variables puedan modificarse.

De la misma manera se puede “repetir” un telefonema en cualquier momento. Este modo bloquea los campos variables para impedir su modificación.

### Visualización de Telefonemas

En la zona de visualización de telefonemas disponemos de una lista desplegable de selección en la que se puede elegir qué telefonemas mostrar, aunque por defecto estará marcada la opción de recientes, que son los telefonemas registrados en las últimas 24 horas. Otras posibilidades son las siguientes:

- Todos que permite visualizar los telefonemas del último mes.
- Energía que visualiza los telefonemas de energía del último mes.
- Precauciones que muestra los telefonemas de precauciones del último mes.
- Novedades que visualiza los telefonemas y novedades del último mes.

Figura 19. Vista detalle de la tabla de Telefonemas

Fecha Hora	Num. Expedido	Num. Recibido	Estación Comunicada	Telefonema
17/12/2009 07:40:42	138	335	GAINTXURIZKETA	VIA LIBRE ENTRE AZPETITIA Y LASAO POR VÍA UNICA .
17/12/2009 07:39:39	137	44	P.M. ATXURI	ENTRE ARIZ Y LASARTE SUPRIMIDO TREN 21001 ....
17/12/2009 07:38:43	131	167	DONOSTIA	ENTRE RENTERIA Y DONOSTIA CIRCULA TREN MATERIAL SERIE RT6 QUE SALDRÁ A LAS 07:34 .
17/12/2009	136	77	OTARTZUN	ENTRE OTARTZUN Y ANDETA CIRCULA TREN MATERIAL SERIE OT2AT QUE SALDRÁ A LAS

Fuente: Elaboración propia.

## Auditoría

En el caso de necesitar realizar una auditoría o inspección de los telefonemas registrados no es necesario desplazarse a las dependencias donde se han transmitido los textos, ya que de forma remota es posible extraer toda la información necesaria en caso de incidencia o a una inspección.

## Conclusión aplicación Libro de Telefonemas

Al ser una aplicación desarrollada en Java con un fichero ejecutable “jar” instalado en una carpeta compartida de red y con una conexión a una base de datos SQL Server 2008R, su distribución e instalación es muy sencilla, puesto que no necesita grandes requerimientos técnicos ni de hardware<sup>0</sup>.

Con este nuevo formato de Libro de Telefonemas se logran varias ventajas, entre las cuales podemos destacar las siguientes:

No se puede manipular; desaparecen los borroneos, tachaduras, falsificaciones, etc.

En caso de incidencia o inspección la recogida de datos se realiza a distancia y al momento sin necesidad de acudir a la dependencia.

Se reduce el uso del papel.

La opción de favoritos elimina el uso de sellos de caucho de los telefonemas más usados.

Las funciones de filtro y búsqueda de telefonemas en la base de datos facilita el uso de los textos menos utilizados.

La experiencia del usuario es muy positiva con el nuevo entorno.

Aumento de la capacidad de registro de históricos prácticamente ilimitada y reducción de sitio de almacenaje físico de libros en papel.

Todas estas ventajas sitúan esta aplicación en una posición muy ventajosa frente al uso del obsoleto Libro de Telefonemas en formato de papel, relegando el uso del papel a un segundo término y solo en caso de incidencia.

## 4. COMPLEMENTO EXCEL PLASER 2010 (PLANIFICACIÓN DEL SERVICIO)

A la hora de planificar un servicio ferroviario casi todas las empresas disponen de algún software de planificación desarrollado a medida. Sin embargo muchas de estas aplicaciones carecen de un formato de impresión o presentación lo suficientemente atractivo para su uso.

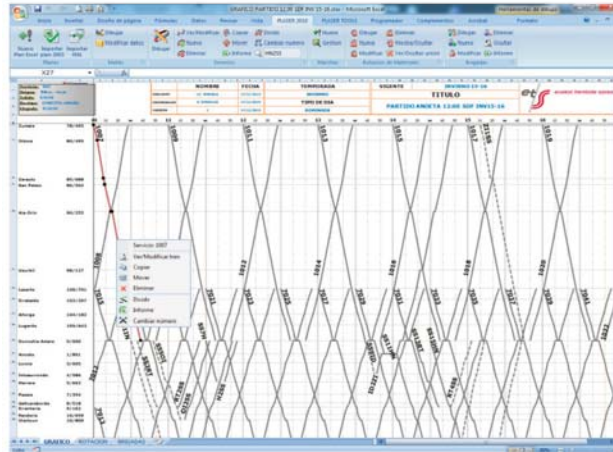
Para explotaciones ferroviarias pequeñas es una herramienta ideal de bajo coste y alto rendimiento, que permite, con un esfuerzo mínimo, crear planes complejos.

Para las empresas que disponen de una herramienta planificación y quieren mejorar su presentación de mallas en papel o realizar proyecciones sencillas y rápidas, ésta es la herramienta perfecta. Con este complemento es posible importar los datos de un servicio completo de otra herramienta que exporte ficheros xmly plasmarlos en un libro Excel aplicando un formato atractivo para imprimir o publicar en pdf.

Esta herramienta desarrollada como un complemento de Excel 2007, 2010 y 2013 que conecta con una base de datos SQL Server 2008R en red, permite planificar un servicio ferroviario completo, marchas,

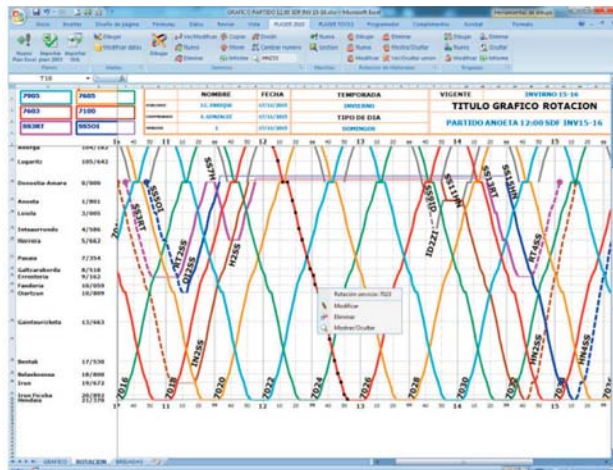
servicios, rotación de materiales, turnos de maquinistas, libro de itinerarios, etc. de manera gráfica y sencilla, aprovechando la potencia de Excel en la presentación de pantalla y como herramienta de dibujo.

Figura 20. Malla de servicios



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Malla de servicios



Fuente: Elaboración propia.

### Configuración del sistema

El uso una base de datos en red permite la utilización de la aplicación por múltiples usuarios simultáneamente.

Una vez establecida la topología de las líneas y ramales con sus puntos de control ya es posible trabajar con el complemento.

Todas las planificaciones se guardan en un fichero Excel que puede ser visualizado y tratado en cualquier equipo que disponga de Excel 2007 o superior.

Los formatos de los textos, etiquetas de puntos de control, etiquetas de rango horario, ancho y color de las líneas de los servicios, etc. son configurados y aplicados a la planificación activa o a todas las que se desarrollen a partir aceptarse el cambio.

### Importación de planes

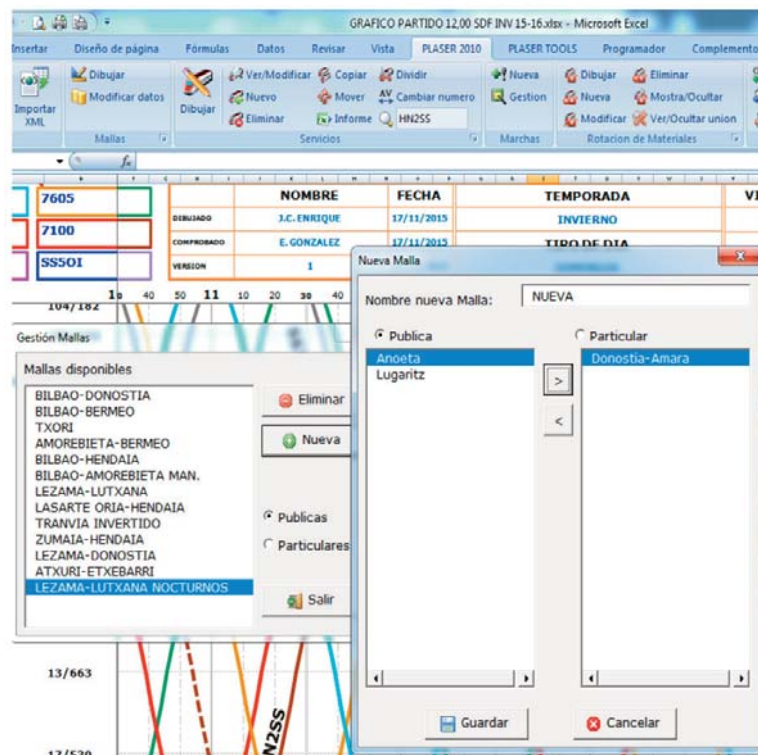
El sistema permite la importación de planes de otras aplicaciones. Actualmente se importan planes de la versión anterior del complemento Plaser98-2003 y de un fichero xml generado por la herramienta de planificación de Euskotren Operador.

### Mallas

Las mallas o rejillas de los gráficos establecen los puntos de control que deseamos que se visualicen en la pantalla, esto no quiere decir que los servicios estén limitados por la parte visible de la malla, si no que pueden sobrepasar estos límites, siempre que la marcha del servicio lo permita. Es posible presentar hasta tres mallas diferenciadas en la misma hoja Excel, lo que permite separar ramales o líneas independientes en una sola presentación.

Las Mallas se guardan en la base de datos y pueden ser públicas o privadas del usuario que las crea.

Figura 22. Gestión y creación de Mallas



Fuente: Elaboración propia.



## Marchas tipo

Las marchas son exclusivas del plan o libro activo y se guardan en el archivo de Excel de la planificación que se está desarrollando. Una vez creada la marcha tipo está disponible para su uso en los servicios.

Al tratarse de una herramienta sencilla, los cálculos de las marchas no tienen en cuenta el vehículo, son creadas en función de la velocidad media de los tramos.

Figura 23. Creación de nueva Marcha Tipo

The screenshot shows the 'Nueva Marcha' window. At the top, the name 'MARCHA NUEVA' is entered. Below it, a list of stations is shown, with 'Oartzun' selected. To the right, a table displays the sequence of points and stops for the train type.

Secuencia	Punto	Nemónico	Marcha	Parada	Tipo Parada
1	Donostia...	SS			COMERCIAL
2	Anoeta	AT	00:00:00	00:00:00	COMERCIAL
3	Lobiola	LL	00:02:30	00:00:00	COMERCIAL
4	Intxaurr...	ID	00:02:30	00:00:00	COMERCIAL
5	Herrera	H	00:01:30	00:00:00	COMERCIAL
6	Pasaia	PA	00:02:30	00:00:00	COMERCIAL
7	Galtzara...	RG	00:02:00	00:00:00	COMERCIAL
8	Errenteria	RT	00:01:00	00:00:00	COMERCIAL
9	Fanderia	RF	00:01:30	00:00:00	COMERCIAL
10	Oartzun	OY	00:01:00		COMERCIAL

At the bottom, there are input fields for 'Hora salida:', 'Velocidad Comercial tónica: 40 Km/H', and 'Tipo Parada' set to 'COMERCIAL'. Buttons for 'Guardar' and 'Salir' are also visible.

Fuente: Elaboración propia.

## Servicios

Los servicios se crean a partir de una marcha tipo definida con anterioridad, el origen y destino del servicio debe estar dentro de los límites de la marcha. Los servicios se guardan en el archivo Excel.

Actualmente se encuentra en fase de desarrollo una nueva función en la que se puede indicar a cada servicio las vías de circulación, paso, y estacionamiento con solo elegir el Tipo Tren en el campo correspondiente.

Figura 24. Formulario Nuevo Servicio

Punto control	Net	Hora salida	Tipo parada
IRUN	IN	5:00:00	COMERCIAL
Belaskoenea	BL	5:02:00	COMERCIAL
Bentak	IR	5:04:00	COMERCIAL
Araso	IA	5:07:00	TECNICA
Gaintxurizketa	G	5:09:00	NO
Oiartzun	OY	5:13:00	COMERCIAL
Fanderia	RF	5:14:00	COMERCIAL
Errenteria	RT	5:16:00	COMERCIAL
Galtzaraborda	RG	5:18:00	COMERCIAL
Pasaia	PA	5:20:00	COMERCIAL
Herrera	H	5:23:00	COMERCIAL
Intxaurreondo	ID	5:25:00	COMERCIAL
Loiola	LL	5:27:00	COMERCIAL
Anoeta	AT	5:30:00	COMERCIAL
DONOSTIA-AMARA	SS	5:33:00	COMERCIAL
Lugaritz	LD	5:39:00	COMERCIAL
Añorga	AÑ	5:42:00	COMERCIAL
Errekalde	EK	5:45:00	COMERCIAL
Lasarte	LT	5:48:00	COMERCIAL

Fuente: Elaboración propia.

Una vez creado es posible realizar varias operaciones con el servicio solo con seleccionar el servicio en la hoja:

**Ver/modificar:** permite realizar todos los cambios que sean necesarios.

**Copiar:** copia un servicio de forma individual o cadenciada.

**Mover:** adelanta o atrasa la hora de salida de un servicio.

**Eliminar:** elimina el servicio seleccionado

**Dividir:** separa el servicio en dos partes indicando los puntos de corte.

**Informe:** se obtiene un informe individual del servicio, indicando su itinerario y cruzamientos con otros servicios.

**Cambiar número:** permite cambiar el nombre del servicio asignado.

Figura 25. Opciones Servicio

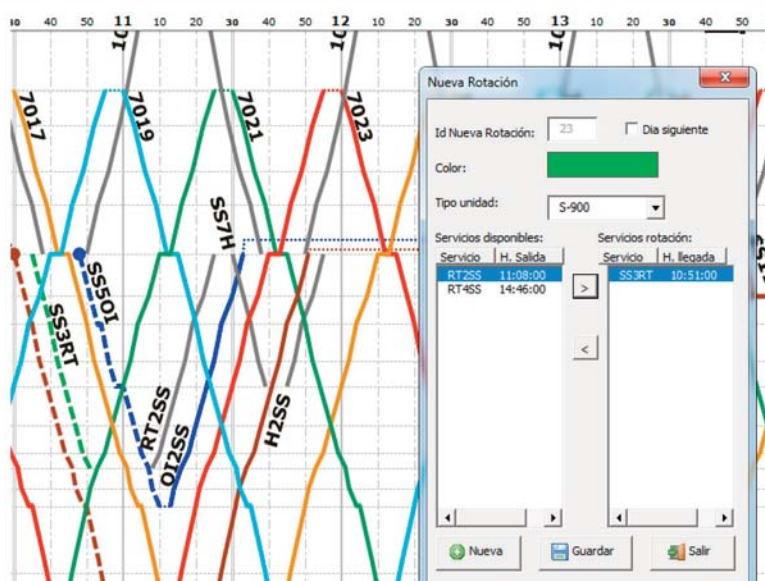


Fuente: Elaboración propia.

### Rotación de materiales

La rotación de materiales se realiza de forma gráfica sobre la pantalla seleccionando los servicios que forman parte de la secuencia de rotación. El sistema solo muestra los servicios que están disponibles en el punto de control de destino del último servicio. La forma de operar es muy sencilla y rápida.

Figura 26. Nueva Rotación



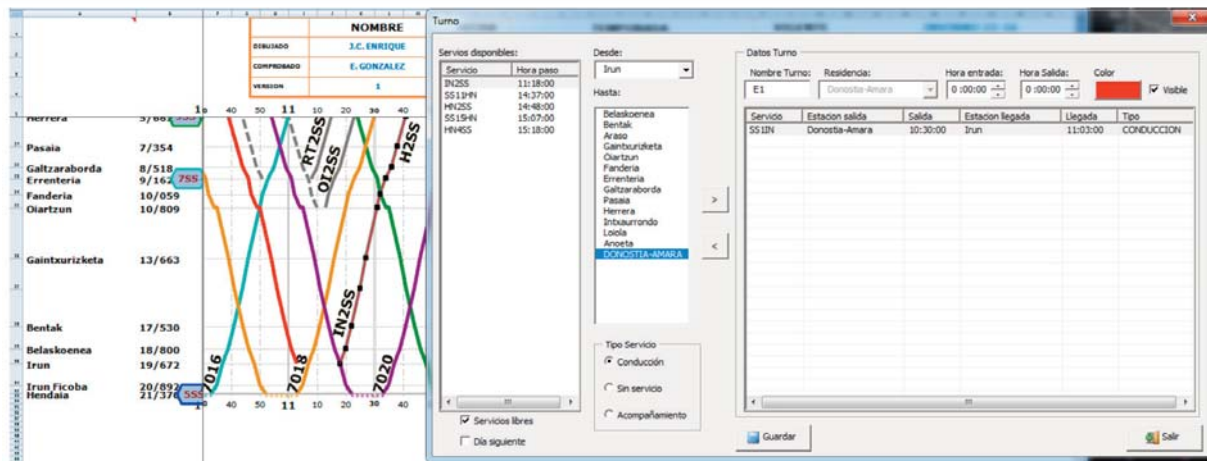
Fuente: Elaboración propia.

Las operaciones que se pueden realizar sobre una rotación son las de modificar, eliminar y ocultar.

### Turnos de maquinistas

También, si es necesario, se pueden realizar los turnos de los maquinistas, de igual forma que la rotación de los materiales.

Figura 27. Nuevo turno



Fuente: Elaboración propia.

Las operaciones que se pueden realizar son las de modificar, eliminar y ocultar. También se obtiene un informe en formato Excel con el desarrollo completo del turno o turnos creados.

### Libro de Itinerarios

Una vez está desarrollado el plan completo se puede obtener un Libro de Itinerarios completo o parcial con todos los horarios de paso y cruzamientos de los servicios, también en formatos Excel.

Figura 28. Libro de Itinerarios

Libro Itinerarios

Descripción evento: PARTIDO ANOETA 12:00 SDF INV15-16

Fecha ejecución: 17/11/2015 Hora Inicio: 0:00:00 Hora Fin: 23:59:00  Agrupar cruces(PENDIENTE)

Modo:  Horarios y cruces  Solo horarios

Servicios:  Todos  Solo completos en LI

Estaciones disponibles: Hendaia

Estaciones L.I.: Lasarte, Errekalde, Añorga, Lugaritz, Donostia-Amara, Anoeta, Loiola, Intxaurrondo, Herrera, Pasaia, Galtzaraborda, Errenteria, Fanderia, Oiartzun, Gaintzurizketa, Araso, Bentak, Belaskoenea, Irun, Irun Ficoba

Generar Salir

Fuente: Elaboración propia.

### Cortes de circulación o Transbordos

Los cortes de circulación o transbordos son sucesos que no ocurren con frecuencia. Algunos pueden ser planificados o debidos a una incidencia y la herramienta dispone de una funcionalidad que permite proyectar un transbordo o corte de circulación, simplemente eligiendo los puntos de control entre los que está afectado el plan de transporte y donde hay que ejecutar el transbordo.

### Conclusión complemento Excel Plaser2010

Como puede observarse, la aplicación dispone de múltiples funciones: permite la expansión y crecimiento y proporciona flexibilidad casi total.

En estos momentos es la herramienta más utilizada en Euskotren Operador y ETS-RFV debido a que permite planificar con gran rapidez y eficacia, reduciendo los tiempos de programación y desarrollo de un plan de explotación.

Esta herramienta no está integrada con los demás sistemas de Explotación, es un complemento que permite hacer estudios y propuestas de servicio de manera rápida, aislada al resto de sistemas. Con este complemento se logran varias ventajas, entre las cuales podemos destacar las siguientes:

Los gráficos obtenidos en las hojas de Excel permiten su manipulación para incluir anotaciones.

Al ser Excel una aplicación estándar del paquete de Office es posible utilizarla sin adquirir software adicional.

También es posible la portabilidad de un plan a un equipo que no esté conectado a la base de datos, ya que al crearse un nuevo plan se portan los datos de la DB al plan activo, pudiendo trabajar en un plan de forma autónoma.

Se trata de una herramienta muy sencilla de utilizar y que permite realizar planes de transporte de manera ágil y rápida.

# La Alta Velocidad en el desierto: HARAMAIN HIGH SPEED RAILWAY LINE (HHSRL) “Propuesta de Medidas ecológicas de defensa de la Plataforma de vía frente a la acción del viento”

## *Measures proposed ecological protection platform track against windblown*

Luís Fort López-Tello<sup>1</sup>

### RESUMEN

Partiendo de un estudio general desarrollado por BMT Fluid Mechanics sobre los efectos del viento en las zonas arenosas del trazado de la HHSRL La Meca-Medina se hace una propuesta de medidas de defensa de la plataforma de vía consistente en la creación de ocho parques lineales situados en el lado Oeste de la línea a lo largo de sus primeros 210 km y localizados en las zonas con mayor cantidad de arrastres de arena, que totalizan un desarrollo de 21km y más de 120 has de zonas verdes, susceptibles en una etapa final de un aprovechamiento forestal y ganadero.

### PALABRAS CLAVE

Alta velocidad, Desierto, Dunas, Defensa contra viento, Arrastre de arena.

<sup>1</sup> Dr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dr Ingeniero Agrónomo lfort@ciccp.es Jubilado de los Cuerpos de Ingenieros de Caminos del Estado y de Profesores Titulares de Universidad Politécnica de Madrid.

## **ABSTRACT**

Based on a comprehensive study by BMT Fluid Mechanins on the effects of wind on the sandy areas of the Haramain High Speed Railway Line (HHSRL) Mecca-Medina, Saudi Arabia, a proposal for measures to protect the platform track consisting of the creation of eight linear parks located on the west side of the line along its first 210 km and located in areas with the largest number of tows sand, totaling a development of 21 km and more than 120 hectares of green, susceptible areas in a final stage of forestry and livestock use.

## **KEY WORDS**

High speed, desert, dune, line protection against windblown.



## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio general desarrollado por BMT Fluid Mechanics en 2009-2010 por Al Rajhi Alliance (Contratista de los Trabajos de la Fase 1), sobre los efectos del viento en las zonas arenosas del trazado de la Línea de Alta Velocidad La Meca-Medina “Haramain High Speed Railway Line (HHSRL)”, señala la existencia de 20-25 Km del mismo con riesgo de invasión de la plataforma por avance de dunas de arena, pudiéndose extender los problemas de contaminación de la superestructura de vía y material móvil, por arrastre de arena y polvo a unos 197 Km a lo largo de la línea.

**Figura 1. Arrastre de la arena por el efecto del viento en el proyecto HHSRL**



Fuente: Imagen de la plataforma en obras del 2014 (Chema Moya- EFE). Boletín Vía Libre (9/03/2016)

A continuación se reproducen las tablas de ese estudio, que identifican los tramos afectados por estos problemas.

**Tabla 1. Secciones generales con problemas de arena y polvo**

TRAMOS	LONGITUD (KM)
Km 006 a Km 072	66
Km 080 a Km 211	131
<b>Total</b>	<b>197</b>

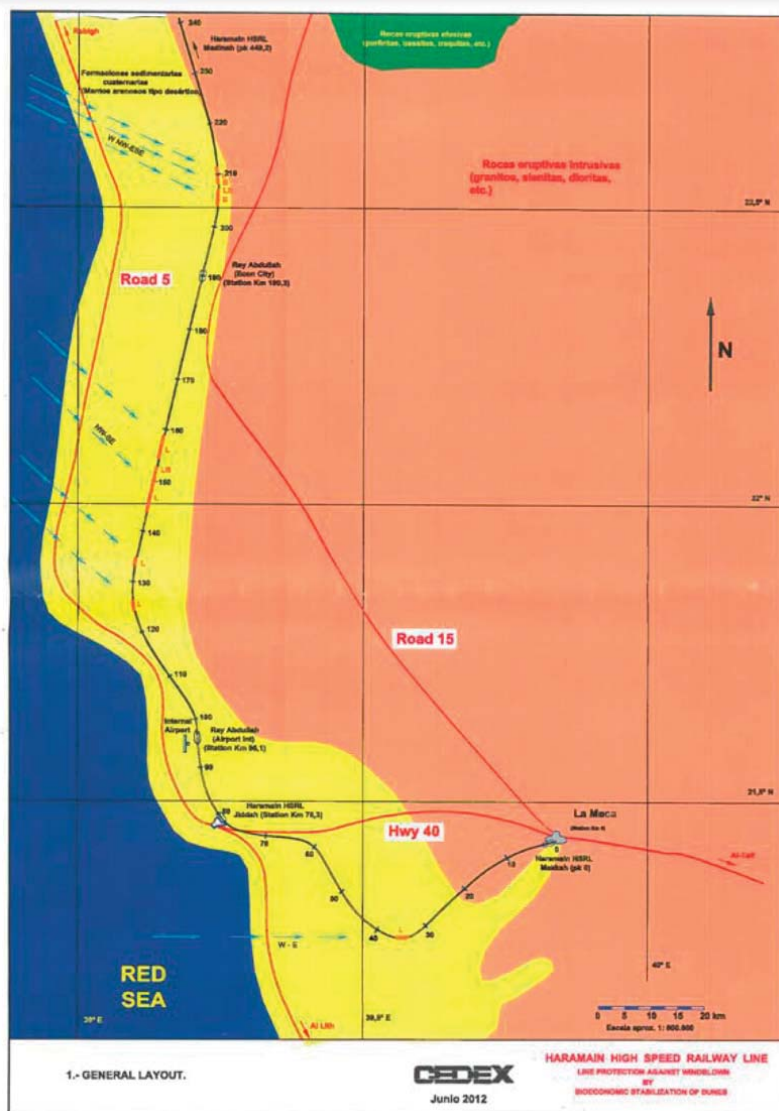
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2. Tramos específicos con riesgo de invasión por dunas**

TRAMOS	MORFOLOGÍA DE DUNA	TENDENCIA	LONGITUD (KM)
Km 34,6 a 36	Lineal (L)	W-E	1,4
Km 123,6 a 124,2	Lineal (L)	NW-SE	0,6
Km 133,6 a 134,4	Lineal (L)	NW-SE	0,8
Km 143,6 a 151,4	Lineal (L)	NW-SE	7,8
Km 151,4 a 153,2	Lineal (L) y Barchan (B)	NW-SE	1,8
Km 154,1 a 158,5	Lineal (L)	NW-SE	4,4
Km 204,0 a 205,2	Barchan (B)	WNW-ESE	1,2
Km 205,5 a 206,5	Lineal (L), Barchan (B) y Seif (S)	WNW-ESE	1
Km 297,2 a 207,9	Lineal (L) y Barchan (B)	WNW-ESE	0,7
Km 207,9 a 208,2	Barchan (B)	WNW-ESE	0,3
Km 209,5 a 210,5	Lineal (L)	WNW-ESE	1
<b>TOTAL</b>			<b>21</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Planta General Línea La Meca-Medina (Pk 1 – Pk 240)



Fuente: CEDEX Año 2012.

## 2. BASES DE PARTIDA

Partiendo de la información general existente (notas y gráficos de prensa sobre la línea de alta velocidad y mapas físicos, políticos, de comunicaciones, geológicos y fitoclimáticos de Arabia Saudí) en el plano esquemático anterior se representan de forma aproximada las carreteras de la zona (en rojo) y el trazado de la Haramain HSRL en su primera mitad (en negro), desde la ciudad de La Meca Km 0, hasta las proximidades de Rabigh, en la que se localizan (coloreados) los tramos con riesgo de problemas de invasión de arena y polvo sobre la plataforma de vía, con formación de dunas (lineales (L) y Barchan (B)), según las direcciones de viento dominante.

En toda esta zona (21° - 23° N y 40° - 39° E) el trazado se acerca primero a la costa, pasando por la ciudad de Jiddah, continuando después paralelo a la misma por la franja costera de menos de 30 Km de ancho, de formaciones sedimentarias cuaternarias constituidas por mantos arenosos tipo desértico (amarillo),

limitada en el Oeste por el Mar Rojo, que ocupa la depresión formada por la fosa tectónica que separa la península arábiga de África (azul), y en el Este por la inmensa meseta suavemente inclinada hacia el ENE y constituida por un viejo zócalo de rocas cristalinas (recubierto en parte por rocas sedimentarias areniscas y calcáreas) intrusivas de tipo granítico (naranja), con vastas expansiones de lavas, manifestaciones de una actividad eruptiva continuada en algunas zonas, más próximas a Medina.

Partiendo de los datos de arrastre de arenas y polvo contenidos en el informe previo de BTM y en la bibliografía disponible, se pueden diferenciar bajo este punto de vista, determinante para la elección y dimensionamiento de las medidas de defensa y mantenimiento de la plataforma de la línea, dos zonas de estudio: Makkad-Jiddah y Jiddah-Rabigh.

Al sur de Jiddah, en la zona costera hacia Al-Lith, A. Al-Harhi da la información siguiente de arrastres medidos:

- Dune area: 29,2 m<sup>3</sup> /m/yr
- Interdune area: 12,8 m<sup>3</sup>/m/yr
- No dune:
  - a) Sand sheet: 2,3 m<sup>3</sup>/m/yr
  - b) Sabkha area: 6,5 m<sup>3</sup>/m/yr

El estudio de BMT, utilizando ecuaciones teóricas de transporte de arena por el viento, como la de O'Brien:

$$G(\text{pounds / foot / day}) = 0,036U_{5ft}^3 \quad (\text{feet / sec}) \quad [1]$$

estima para el área Sur (Makkah-Jiddah) del HHSRL, una tasa media de transporte de arena de 1,2 m<sup>3</sup>/m/yr, y para su área Norte (Jiddah-Rabigh) tasas que alcanzan 40 m<sup>3</sup>/m/yr.

Otras informaciones (Abdulmalik et al.) citan que en algunas áreas del desierto saudí las tasas anuales de arenas varían de 10 a 120 Tons/m y pueden alcanzar valores más altos en áreas muy activas, pero para el trazado de la HHSRL, la cantidad de arena transportada deberá ser menor.

### 3. PROPUESTA DE MEDIDAS DE DEFENSA

La idea que se expone a continuación se plantea en base a la información antes citada y teniendo en cuenta que el problema que se presenta no es el de atravesar el desierto de Arabia con una línea de alta velocidad, sino el que ésta deba mantener su funcionalidad soportando la incidencia de un fenómeno "acotado" de erosión eólica.

Este fenómeno es acotado y conocido porque se localiza en una franja costera arenosa, limitada por macizos rocosos en el interior, y en la que ya existen otras infraestructuras de transporte, como son la carretera que une La Meca con Jiddah y las costeras que comunican esta ciudad con las poblaciones de Al Lith al Sur y Rabigh al Norte, pasando por el importante aeropuerto internacional Rey Abdullah próximo a la ciudad de Jiddah, que aunque pueden ser menos exigentes en la intensidad de su conservación, ya ofrecen la experiencia e información básica de partida para un adecuado proyecto de las obras de defensa de la nueva línea y el mantenimiento de la misma.

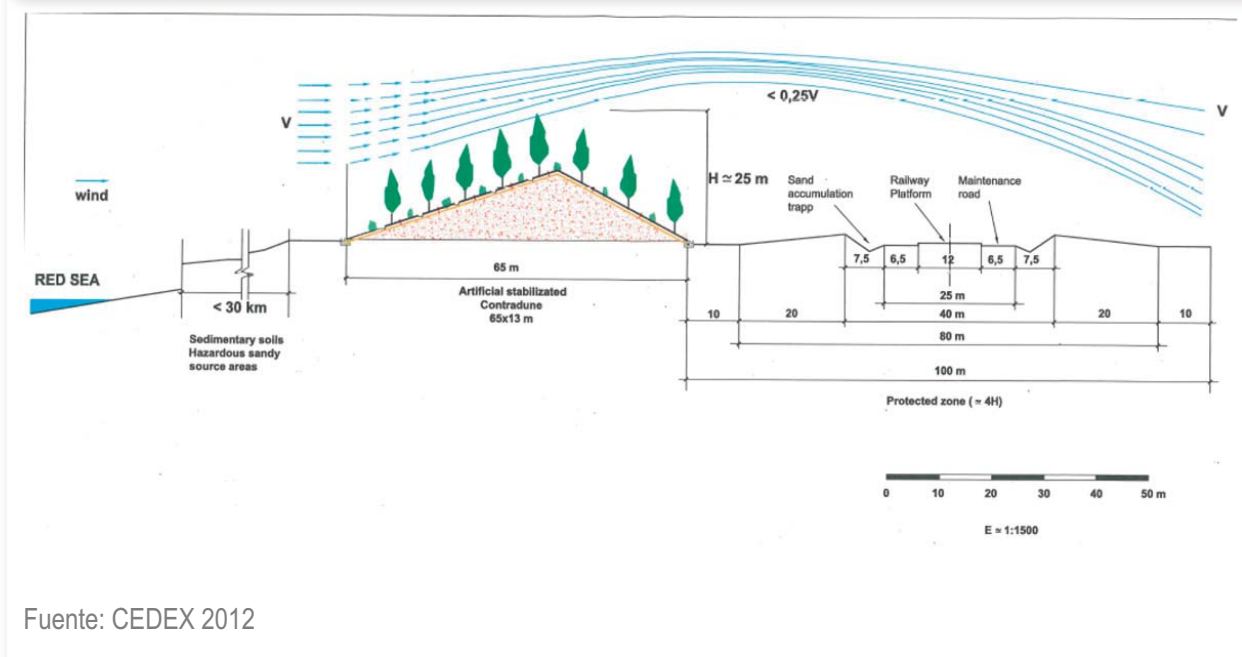
La idea que se presenta a continuación, para en su caso ser objeto de un desarrollo posterior más ajustado a la realidad, es la creación de ocho parques lineales a lo largo de los 210 Km iniciales de la

línea, situados en su lado Oeste sobre contradunas artificiales construidas en aquellas localizaciones con mayor cantidad de arrastres de arena y por tanto con mayor riesgo y magnitud de invasión de la vía, que totalizan un desarrollo de 21 Km, con la creación de más de 120 Has de zonas verdes, susceptibles en una etapa final de un aprovechamiento forestal y ganadero limitado, pero que en todo caso supondría la reducción de al menos el 10% de los gastos de mantenimiento de este trayecto y la contribución para sufragar una parte del 90% restante, con la utilización bioeconómica de esta medida de defensa.

En el resto de las secciones generales de la línea con problemas de arena (176 Km), bastaría para el mantenimiento de la plataforma de la vía la ejecución de unas zanjas laterales a la misma para depósito de los arrastres de arena de menor cuantía que tendrían lugar en estas zonas y que habría que limpiar periódicamente.

Dadas las características climáticas de la zona, la creación de los parques lineales para la utilización bioeconómica de la contraduna de defensa en los tramos específicos de mayor riesgo de invasión, hace imprescindible la necesidad de su riego. Este se plantea reutilizando aguas residuales de las plantas depuradoras de las ciudades de Makkah y principalmente de Jiddah, lo que hace que, dada la ubicación distribuida a lo largo de la línea, de los parques sobre contradunas, con la necesidad de continuidad en la impulsión de suministro del agua de riego, pueda utilizarse ésta para el riego de una continuada franja verde, que uniendo los parques lineales mencionados, hagan de la línea Haramain un corredor medioambiental integrado y de interés económico su aprovechamiento, potenciando bioeconómicamente esta importante zona costera de la península arábiga.

Figura 3. Esquema de la protección al arrastre de la arena por el viento



Fuente: CEDEX 2012

## 4. DIMENSIONAMIENTO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

Franja defendida: 100 m

a) Trayecto Makkah-Jiddah

- Zona sin dunas (no dune area)

i. Aporte de arena

$$G = 2,3 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr} \quad U_{1a} \approx 18,5 \text{ m/s}$$

ii. Defensa con zanjas laterales (Sand Trap)

$$\text{Capacidad mínima útil: } V = \frac{1}{2} 7,5 \times 1,5 = 5,63 \text{ m}^3 / \text{m}$$

$$\text{Limpieza de zanjas: } t = \frac{5,63}{2,3} \approx 2,5 \text{ años}$$

- Zona de dunas (Dune area)

i. Aporte de arena

$$G = 29,2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr} \quad (U_{2a} \approx 43 \text{ m/s})$$

ii. Defensa con zanjas laterales y contraduna

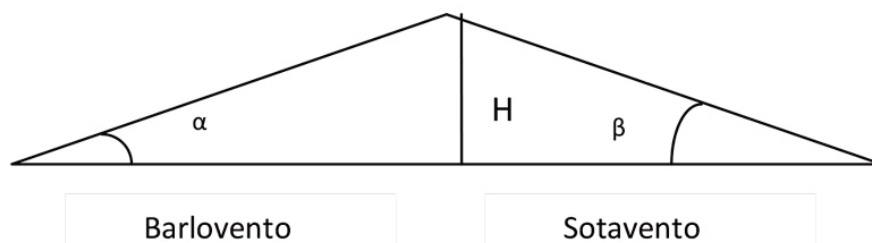
$$U_r \approx U_1$$

$$\frac{U_r}{U} = 43\% \quad U_r > 43\% \rightarrow D_r \approx 0 \text{ a } 13 \text{ H} \rightarrow D_r = 100 - (20 + 10 + 7,5) = 62,5 \text{ m}$$

[2]

$$H \approx \frac{62,5}{13} \approx 5 \text{ m}$$

Figura 4. Esquema contraduna



Fuente: Elaboración propia

Estabilidad crítica para  $H = 5 \text{ m}$   $\alpha = 20^\circ$  y  $\beta = 45^\circ$

1. Construcción de contraduna: Con palizada

$$t_0 = \text{Yr } 0 \quad t_c = 1 \text{ year}$$

2. Formación de contraduna: Con propios aportes futuros

$$t_1 = \text{Yr } 1 \quad t_f = 2 \text{ years}$$

$$V = \frac{1}{2} 3,75 H^2 = 46,9 \text{ m}^3 / \text{m} \rightarrow 29,2 - 2,3 = 26,9 \text{ m}^3 / \text{m} / \text{yr} \rightarrow t_f \approx \frac{46,9}{26,9} \approx 2 \text{ yr} \quad [3]$$

3. Estabilización preliminar: Con hidrosiembra de barrón (*Ammophila arenaria*) y maná (*Lecanora esculenta*), complementaria con riego superficial de oxiasfalto o emulsión bituminosa hidrófila ( $\approx 1,5 \text{ l/m}^2$ )

$$t_2 = \text{Yr } 3 \rightarrow t_{ps} \approx 1 \text{ year}$$

4. Estabilización secundaria: Con plantación de especies subarbusivas y arbustivas (*Alhagi camelorum*, *Catha edulis*)

$$t_3 = \text{Yr } 4 \rightarrow t_{ss} \approx 1 \text{ year}$$

5. Estabilización permanente: Con plantación de árboles, como acacias y especies arbóreas africanas (*casuarina equisetifolia*, *Tamarix africana*)

$$t_4 = \text{Yr } 5 \rightarrow t_{ds} \approx 2 \text{ years}$$

Utilización bioeconómica: Explotación maderera y pastoreo

$$t_5 = \text{Yr } 7 \rightarrow t_{bn} \approx \text{indefinitely}$$

b) Trayecto Jiddah-Rabigh

• Zona sin dunas (no dune area)

i. Aporte de arena

$$G = 6,5 \text{ m}^3 / \text{m} / \text{yr} \quad (U_{1b} \approx 26,1 \text{ m/s})$$

ii. Defensa con zanjas laterales (Sand Trap)

$$\text{Capacidad mínima útil: } V = \frac{1}{2} 10,5 \times 3 = 16,25 \text{ m}^3 / \text{m}$$

$$\text{Limpieza de zanjas: } t = \frac{16,25}{6,5} \approx 2,5 \text{ años}$$

• Zona de dunas (Dune area)

i. Aporte de arena

$$G = 40 \text{ m}^3 / \text{m} / \text{yr} \quad (U_{2b} \approx 47,8 \text{ m/s})$$

ii. Defensa con zanjas laterales y contraduna

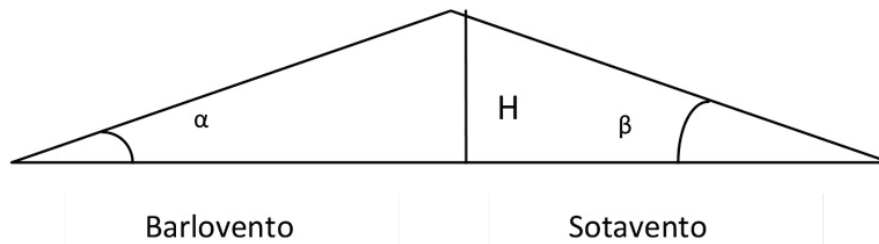
$$U_r \approx U_1$$

$$\frac{U_r}{U} = 54\% \quad U_r > 54\% \rightarrow D_r \approx 0 \text{ a } 5 \text{ H} \rightarrow D_r = 100 - (20 + 10 + 10,5) = 65,5 \text{ m}$$

$$H \approx \frac{65,5}{5} \approx 13 \text{ m}$$

[4]

Figura 5. Esquema contraduna



Fuente: Elaboración propia

Manteniendo criterio de estabilidad crítica para  $H = 5$  m admitiendo rozamiento arena  $\mu = 0,3$  (Tesis Saulot INSA Lyon)

$$\Phi_{eq} \approx 17^\circ \xrightarrow{\text{(Taylor)}} \begin{aligned} &\text{Para } H = 5 \text{ m } \beta = 45^\circ \rightarrow N_e = 0,075 \\ &H = 13 \text{ m } N_e = 0,03 \rightarrow \beta \approx 29^\circ \rightarrow 1:1,8 \\ &\text{Para } H = 5 \text{ m } \alpha = 20^\circ \rightarrow N_e = 0,015 \\ &H = 13 \text{ m } N_e = 0,06 \rightarrow \beta \approx 18^\circ \rightarrow 1:3,1 \end{aligned}$$

1. y 2. -Construcción y formación de contraduna: Completada con bulldozer (técnica australiana), protegida con piedras en barlovento y fajines en su pie a sotavento. La formación únicamente con aportes se descarta por el tiempo que necesitaría para alcanzar la altura prevista. Podría construirse con palizada para formación de contraduna inicial con aportes propios futuros los dos primeros años hasta una cierta altura y completar la formación en el tercer año con materiales de excavación de la plataforma y zanjas y préstamos contiguos, movidos con bulldozer.

$$V = \frac{1}{2}(3,2 + 1,8)H^2 = \frac{1}{2}5 \cdot 13^2 = 422,5 \text{ m}^3 / \text{m} \rightarrow 40 - 6,5 = 33,5 \text{ m}^3 / \text{m} / \text{yr} \rightarrow [5]$$

$$\rightarrow t_f = \frac{722,5}{33,5} \approx 12,5 \text{ años con aportes futuros} \rightarrow \text{excesivo.}$$

3. 4. y 5. -Fases de estabilización: Análogas a las descritas en la otra zona.

Utilización biomecánica: Como la descrita.



## 4. PLANTEAMIENTO DE RIEGO DE LA FRANJA VERDE

Jiddah, el principal puerto del reino, acoge a la mayor parte de los peregrinos que se dirigen a La Meca. Está servido por el Aeropuerto Internacional King Abdulaziz. La Highway 40, que comienza en Jiddah, conecta la ciudad con Makkah, Riyadh y Dammam en la costa este. Es la segunda mayor ciudad de Arabia Saudita, después de la capital Riyadh. La población de la ciudad supera actualmente 3,2 millones de habitantes.

En los años 1970, con el gran crecimiento de la ciudad, en parte debido al incremento de la actividad petrolífera, se construyó una planta de tratamiento de aguas residuales (EDAR), que fue conectada a una red de alcantarillado construida en una parte de la ciudad. Sin embargo, a pesar del incremento continuo de población no se ha desarrollado mucho el sistema de saneamiento. La planta original no puede dar tratamiento a la cantidad de agua residual que la inunda diariamente, dando como resultado la descarga directa al mar de parte del agua residual, permaneciendo por completo la parte norte de la ciudad no conectada al sistema de saneamiento general, sustituido por su vertido en fosas sépticas. A finales del pasado año 2011, una red de drenaje de tormentas ha sido construida en el área sur de la ciudad, para reducir el riesgo de inundaciones. El 26 de Enero de 2011 grandes inundaciones afectaron la ciudad y otras áreas de la Provincia de Makkah. La lluvia acumulada excedió los 90 mm registrados en cuatro horas durante las inundaciones del 25 de Noviembre de 2009.

El clima de Jiddah es árido según la clasificación de Köppen (BWh árido cálido). La temperatura varía en invierno de 19°C de mínima a 29° de máxima como valores medios, siendo en verano 6° ó 7°C superiores. La mínima registrada fue 3°C en invierno de 1995 y la máxima 52°C en Junio de 2010. Tormentas de polvo suceden en verano y algunas veces en invierno, procedentes de los desiertos de la península arábiga o del Norte de Africa.

La precipitación media anual es inferior a 100 mm, y tiene lugar exclusivamente en los meses de Noviembre, Diciembre y Enero, no siendo raros graves incidentes por granizo. La humedad relativa varía de 52% a 63% con una media anual de 55%.

El problema de abastecimiento de agua, se resolvió con la construcción, junto al viejo acueducto alimentado por las fuentes de Waziriyah, a 11 Km de la ciudad, de nuevas conducciones que aportan abundante agua de las numerosas fuentes del oued Fátima, y con dos desaladoras destilando el agua del mar.

Makkah ciudad es la capital de la provincia del mismo nombre y está situada sobre los aluviones de un antiguo oued en un estrecho valle a una altitud de 280 m sobre el nivel del mar, que comprende a su vez los de Altaneem, Bakkah y Abgar. Su población en 2012 es de 2 millones de habitantes, aunque los visitantes, peregrinos en su mayoría, triplican esta cifra todos los años durante el Dhu al Hijjah (12° mes lunar Muslim), llegando actualmente a más de 15 millones de visitantes al año.

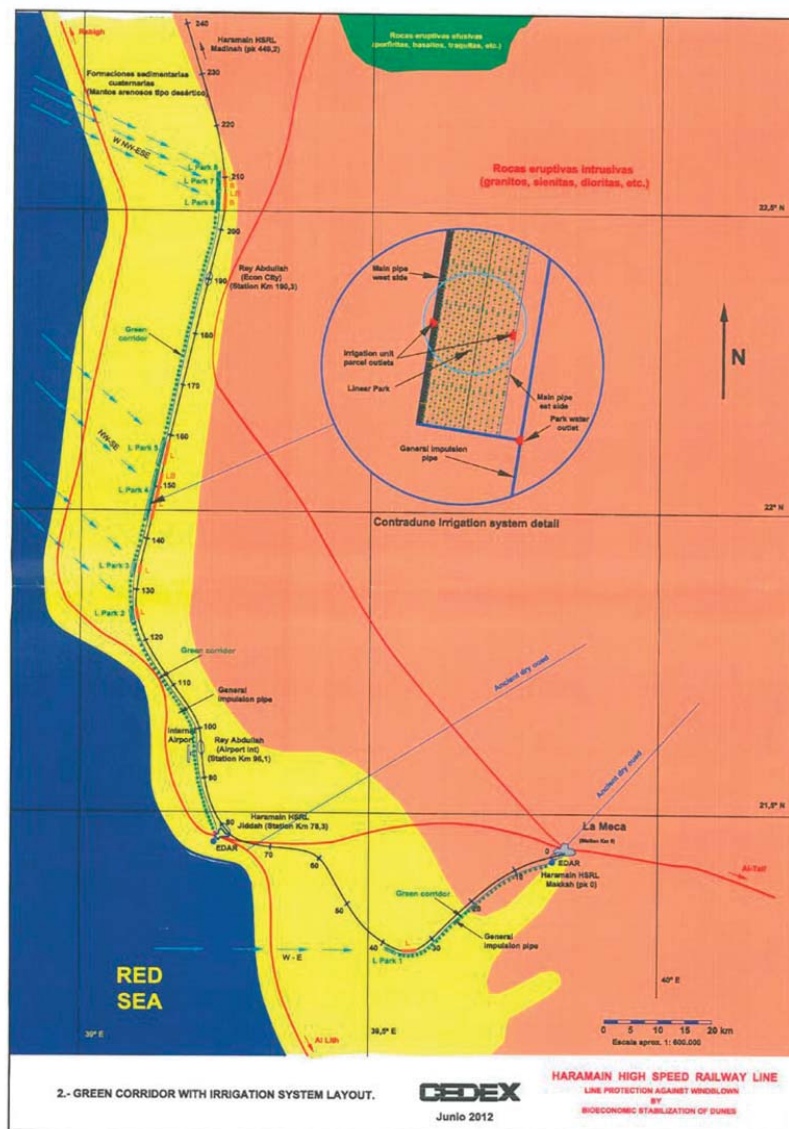
En la pre-moderna Makkah, la ciudad explotaba unas pocas fuentes principales de agua. Las primeras fueron pozos locales, como el bíblico de Zamzam que, según la tradición su agua está bendecida por Dios. El segundo recurso de agua fue el manantial de Ayn Zubayda. Las fuentes de este manantial son las montañas de Jabal Sa'd y Jabal Kabkáb a unos 20 Km al sudeste de la ciudad. El agua se transporta por canales subterráneos. Una muy esporádica tercer fuente de suministro es la lluvia almacenada en pequeños depósitos. La lluvia, aunque escasa también ha originado problemas de inundaciones, la más grave, ocurrida en 1942. Desde entonces han sido construidas presas que han aliviado este problema.

Makkah tiene también un clima extremadamente árido. La temperatura diaria media anual es 30,7°C, la media de las máximas 37,9°C y 24,5°C la de las mínimas, con mínimas medias mensuales en Enero

de 11°C y máximas medias mensuales en Junio de 51,4°C. La precipitación media anual es de 110 mm con medias mensuales superiores a 20 mm en los meses de Noviembre, Diciembre y Enero, 15 mm en Octubre, 12 mm en Abril, 5 a 6 mm en los meses de Marzo, Agosto y Septiembre y menores de 2 mm en Febrero y los meses de Mayo, Junio y Julio. La humedad media relativa es de 46,4% con variación de 33% en el mes de Junio a 59% en Diciembre.

Con las aguas residuales de las EDAR o las pluviales excedentes de las de drenaje de tormentas, en cada una de las dos ciudades, a través de sendos depósitos de almacenamiento y regulación, se alimentarían dos impulsiones de agua para riego de los parques lineales proyectados sobre las contradunas de defensa del ataque de las arenas por el viento a la línea Haramain de alta velocidad y de los dos corredores verdes intermedios que, aprovechando el paso de las impulsiones, pueden crearse con un interés paisajístico de integración medioambiental, pero también susceptible de explotación agro-ganadera.

Figura 6. Corredor verde con irrigación

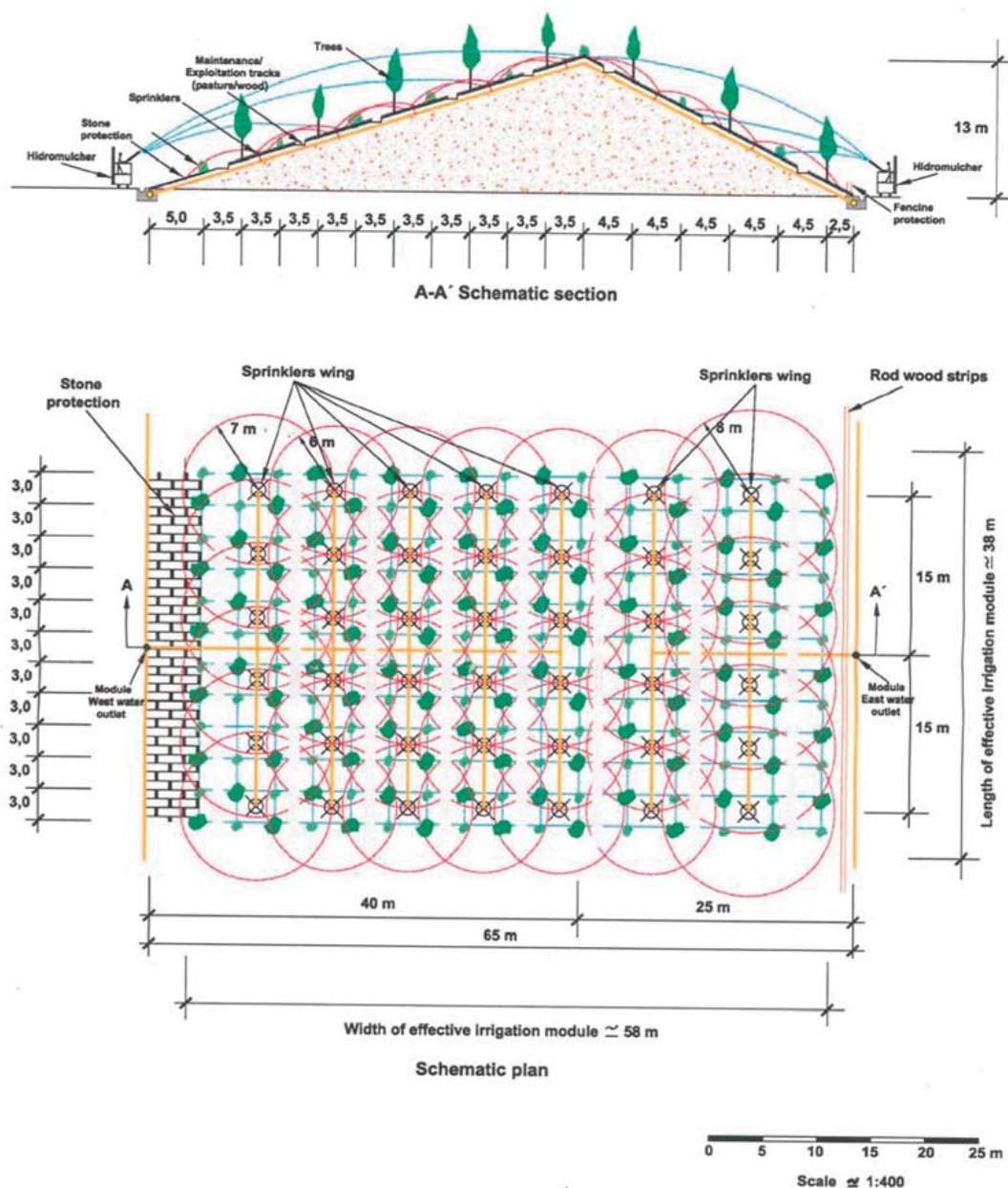


Fuente: CEDEX 2012

El parque lineal 1 situado entre los pK 36 a 38 en el trayecto Makkah-Jiddah, y el corredor verde de unos 35 Km, hasta llegar al parque, serían regados por la impulsión nº 1 desde Makkah.

Los otros siete parques lineales, situados en el trayecto Jiddah-Rabigh, entre los pK 123 y 211, y los aproximadamente 110 Km de corredor verde hasta llegar al parque 8, se regarían con la impulsión nº2, desde Jiddah.

Figura 7. Módulo de irrigación por unidad de parcela



Fuente: CEDEX 2012

Se toma para estimar una dotación de riego las indicadas como de uso habitual en planificación, diseño y explotación de regadíos en los números 81 y 105 de la Revista Ingeniería Civil del CEDEX por los ingenieros agrónomos H. Herminio Castillo y C. Notario, calculadas a partir de los métodos propuestos por la FAO, fundamentalmente el de Penman-Monteith como más adaptado a los valores reales y contrastadas con las obtenidas en las cuencas de la España seca, particularmente en la zona de Almería de la Cuenca Hidrográfica del Sur para cultivos forrajeros (pastizales) y de Alicante-Murcia de la Cuenca Hidrográfica del Júcar para maderables.

La precipitación media anual en Almería es  $\approx 210$  mm y  $\approx 300$  mm en Alicante - Murcia, por lo que a las dotaciones tomadas de los estudios del Cedex sumamos por este concepto 1.000 - 2.000 m<sup>3</sup>/Ha y año.

- Cultivos forrajeros:  $d = 8.539$  m<sup>3</sup>/Ha y año + 1.000 m<sup>3</sup>/Ha y año  $\approx 9.500$  m<sup>3</sup>/Ha y año
- Maderables:  $d = 5.247$  m<sup>3</sup>/Ha y año + 2.000 m<sup>3</sup>/Ha y año  $\approx 7.250$  m<sup>3</sup>/Ha y año

La humedad relativa media en estas localizaciones es  $\approx 67\%$  y la temperatura máxima media es  $\approx 24^\circ\text{C}$ , por lo que, de acuerdo con la fórmula de Lugeon y Meyer, se deben volver a corregir las dotaciones anteriores, para tener en cuenta la mayor evapotranspiración por estas circunstancias, en:

$$\text{Por temperatura: } \frac{273+31}{273+24} = 1,02 \quad \text{Por humedad relativa: } \frac{100-55}{100-67} = 1,36$$

$$0,38 \times 8539 \approx 3245 \text{ m}^3/\text{Ha y año}$$

$$0,38 \times 5247 = 1994 \text{ m}^3/\text{Ha y año}$$

Por lo que se adoptan:

$$\text{Cultivos forrajeros: } d \approx 8.539 + 4.245 \approx 12.750 \text{ m}^3/\text{Ha y año}$$

$$\text{Maderables: } d \approx 5.247 + 3.994 \approx 9.250 \text{ m}^3/\text{Ha y año}$$

Con estas dotaciones específicas, según cultivos, se prediseña el riego de la franja verde anexa a la plataforma de la Haramain HSRL en la sección expuesta a los problemas de arenas arrastradas por el viento, como sigue:

- En parques sobre contradunas:

- Dotación

$$D = 11.700 \text{ m}^3/\text{Ha y año} \quad (12.750 \times 0,7 + 9.250 \times 0,3)$$

$$\text{Incremento por pendiente: } 8,68\% \rightarrow D \approx 12.750 \text{ m}^3/\text{Ha y año}$$

- Superficie a regar. Dimensiones parcelas de riego y volúmenes de agua:

a) Impulsión nº 1

$$L \text{ ParK } 1 \rightarrow S_{p1} = 9,1 \text{ Has} \quad 1.400 \text{ m} \times 65 \text{ m} \quad V_{p1} = 116.025 \text{ m}^3/\text{año}$$

b) Impulsión nº 2

L ParK 2 → $S_{P2} = 3,9$ Has	600 m x 65 m	$V_{P2} = 49.725$ m <sup>3</sup> /año
L ParK 3 → $S_{P3} = 5,2$ Has	800 m x 65 m	$V_{P3} = 66.300$ m <sup>3</sup> /año
L ParK 4 → $S_{P4} = 62,4$ Has	9.600 m x 65 m	$V_{P4} = 795.600$ m <sup>3</sup> /año
L ParK 5 → $S_{P5} = 28,6$ Has	4.400 m x 65 m	$V_{P5} = 364.650$ m <sup>3</sup> /año
L ParK 6 → $S_{P6} = 16,3$ Has	2.500 m x 65 m	$V_{P6} = 207.190$ m <sup>3</sup> /año
L ParK 7 → $S_{P7} = 6,5$ Has	1.000 m x 65 m	$V_{P7} = 82.875$ m <sup>3</sup> /año
L ParK 8 → $S_{P8} = 6,5$ Has	1.000 m x 65 m	$V_{P8} = 82.875$ m <sup>3</sup> /año

- En corredor verde:

● Dotación

$$D = 12.750 \text{ m}^3/\text{Ha y año}$$

● Superficie a regar. Dimensiones parcelas de riego y volúmenes de agua:

a) Impulsión nº 1

- Green Corridor Section1 →  $S_{C1} = 350$  Has

$$35.000\text{m} \times 100\text{m} \quad V_{C1} = 4.462.500 \text{ m}^3/\text{año}$$

b) Impulsión nº 2

- Green Corridor Section2 →  $S_{C2} = 430$ Has

$$43.000\text{m} \times 100\text{m} \quad V_{C2} = 5.482.500 \text{ m}^3/\text{año}$$

- Green Corridor Section3 →  $S_{C3} = 94$ Has

$$9.400\text{m} \times 100\text{m} \quad V_{C3} = 1.198.500 \text{ m}^3/\text{año}$$

- Green Corridor Section4 →  $S_{C4} = 92$  Has

$$9.200\text{m} \times 100\text{m} \quad V_{C4} = 1.173.000 \text{ m}^3/\text{año}$$

- Green Corridor Section5 →  $S_{C5} = 9$  Has

$$900\text{m} \times 100\text{m} \quad V_{C5} = 114.750 \text{ m}^3/\text{año}$$

- Green Corridor Section6 →  $S_{C6} = 455$  Has

$$45.500\text{m} \times 100\text{m} \quad V_{C6} = 5.801.250 \text{ m}^3/\text{año}$$

- Green Corridor Section7 →  $S_{C7} = 7$  Has

$$700\text{m} \times 100\text{m} \quad V_{C7} = 89.250 \text{ m}^3/\text{año}$$

- Green Corridor Section8 →  $S_{C8} = 13$  Has

$$1.300\text{m} \times 100\text{m} \quad V_{C8} = 165.750 \text{ m}^3/\text{año}$$

Por tanto, se necesitan los siguientes volúmenes de agua:

Para la impulsión nº 1 (desde Makkah)

$$V_1 = V_{P1} + V_{C1} = 4,58 \text{ Hm}^3/\text{año} + 10\% \text{ Pérdida} \approx 5 \text{ Hm}^3/\text{año} \quad [6]$$

Para la impulsión nº 2 (desde Jiddah)

$$V_2 = \sum_{i=1}^8 V_{Pi} + \sum_{i=1}^8 V_{Ci} = 1,65 \text{ Hm}^3 / \text{año} + 14,03 \text{ Hm}^3 / \text{año} + 10\% \quad [7]$$

Pérdidas  $\approx 17 \text{ Hm}^3/\text{año}$

El volumen de aguas residuales ( $V_{rw}$ ) en cada una de las dos unidades, parece que debe ser suficiente con amplitud para cubrir estas necesidades, pues será como mínimo, suponiendo que el sistema de depuración alcance a la mitad de población y con una dotación de 100 l/hab/día:

**Makkah:**

$$V_{rw} = 1.000.000 \text{ hab} \times 0,1 \text{ m}^3/\text{hab día} \times 365 \text{ d/año} = 36,5 \text{ Hm}^3/\text{año} \gg 5 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

**Jiddah:**

$$V_{rw} = 1.600.000 \text{ hab} \times 0,1 \text{ m}^3/\text{hab día} \times 365 \text{ d/año} = 58, \text{ Hm}^3/\text{año} \gg 17 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

Se considera parcela mínima:  $S = 1,3 \text{ Has}$

200 m x 65 m

130 m x 100 m

### Impulsión nº 1

$$S = 360 \text{ Has} (10+350)$$

$$n = 277 \text{ parcelas}$$

$$\text{Máx consumo: } \frac{12.750 \text{ m}^3 / \text{Ha}}{7 \text{ meses}} = 1.821 \text{ m}^3 / \text{Ham}$$

$$q = \frac{182 \times 10.000}{30 \times 24 \times 3.600} = 0,70 \text{ l/s/Ha} \quad (\text{caudal ficticio continuo})$$

$$r = \frac{1}{3} \quad (8 \text{ h jornada de riego})$$

$$Q = 252 \times 3 = 756 \text{ l/s.}$$

Conducción general:  $\varnothing = 800 \text{ mm}$  a  $\varnothing = 300 \text{ mm}$

### Impulsión nº 2

$$S = 1230 \text{ Has} (130+1100)$$

$$n = 946 \text{ parcelas}$$

$$\text{Máx consumo: } \frac{12.750 \text{ m}^3 / \text{Ha}}{9 \text{ meses}} = 1417 \text{ m}^3 / \text{Ham}$$

$$q = \frac{142 \times 10.000}{30 \times 24 \times 3.600} = 0,55 \text{ l/s/Ha} \quad (\text{caudal ficticio continuo})$$

$$r = \frac{1}{3} \quad (8\text{h jornada de riego})$$

$$Q = 677 \times 3 = 2030 \text{ l/s.}$$

Conducción general:  $\varnothing = 1300 \text{ mm}$  a  $\varnothing = 300 \text{ mm}$

Las tuberías principales (East/West sides) de los módulos de riego es suficiente tengan un diámetro

$\varnothing = 250 \text{ mm}$  con un timbraje para 4 ats (Coef. seg. total 3).

En los parques lineales las tuberías secundarias y las alas de aspersores se preveen fijas con presión mínima de 2,5 ats.

En el corredor verde, se considera más adecuado el riego mediante un ala de aspersores de 100 m soportada por torres que se desplazan sobre ruedas de accionamiento hidráulico a lo largo de la parcela (130 m).

Las conducciones generales en las impulsiones deberán tener dispositivos antiarriete, dada su gran longitud, pudiéndose adoptar para ellos, la tipología de chimeneas de equilibrio, de 30 m de altura, aprovechándolas como señalización cada 10 Km y dotándolas de un anagrama característico, símbolo de la Haramain HSRL.

Con explotación para la altura de árboles para la que se dimensiona la contraduna  $h = 12 \text{ m}$  (árboles menores y/o arbustos  $h = 5 \text{ m}$ ), se puede estimar una producción maderera estabilizada como sigue:

$$H = 3 + 0,7d - 0,006 d^2 \quad (d \text{ en cm, } h \text{ en m}) \quad d \approx 15 \text{ cm} \quad [8]$$

$$V = 70 - 11d + d^2 \quad (d \text{ en cm, } V \text{ en dm}^3) \quad [9]$$

- Densidad de árboles:

$$n = 238 \text{ pies/Ha}$$

$$V = 30 \text{ m}^3/\text{Ha año}$$

- Densidad de arbustos maderables:

$$n = 238 \text{ pies/Ha}$$

$$V = 18 \text{ estéreos/año} \approx 6\text{T}/\text{Ha año-leña}$$

$$1 \text{ T}/\text{Ha año-corteza}$$

- Pastoreo racional (en regadío):

$$8 \text{ reses lanares/Ha y 5 meses} \approx 5 \text{ reses lanares/Ha año (8 meses)}$$

- Parques:

$$140 \text{ Has} \times 30 \text{ m}^3/\text{Ha año} = 4200 \text{ m}^3 \text{ madera/año}$$

140 Has x 6 T/Ha año = 870 T leña/año

140 Has x 1 T/Ha año = 140 T corteza/año

140 Has x 5 reses/Ha año = 700 reses lanares/año

- Corredor verde: 1450 Has x 5 reses/Ha año = 7250 reses lanares/año.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Fort, L. (1980) "Fijación de dunas (Cap. 15 Geotecnia Vial)" *Geotecnia y Cimientos Tomo III Segunda Parte. Edición Coordinada y Dirigida por José Antonio Jiménez Salas* ISBN: 84-7207-017-4 Ed. Rueda. Madrid, España.

[2] Fort, L. (1975) "Modelo para el estudio de la acción de la vegetación sobre las características resistentes del terreno: Efecto estabilizador en taludes". *Tesis doctoral dirigida por el Catedrático de Edafología Carlos Roquero de Laburu. E.T.S. de Ingenieros Agrónomos. Madrid, España.*

[3] Fort, C. (2013) "Caracterización de los parámetros de resistencia al corte y erosionabilidad del suelo para su aplicación en los problemas de estabilidad de taludes en obras lineales". *Tesis doctoral dirigida por Luis Fort López-Tello. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España.*



# NEOBALLAST\*: Desarrollando el balasto del futuro

## *NEOBALLAST: Seeking the ballast of the future*

N. Manzo Costanzo<sup>1</sup>, A. López Pita<sup>1</sup>, V. Fontserè<sup>2</sup>, J.A. Casado<sup>3</sup>, I. Carrascal<sup>3</sup>, S. Diego<sup>3</sup>

<sup>1</sup> E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

<sup>2</sup> COMSA S.A., Barcelona, España

<sup>3</sup> E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Santander, España

### RESUMEN

Los costes de mantenimiento en vías en balasto han ido incrementado significativamente en las últimas décadas como producto del aumento de las velocidades comerciales, un ejemplo reciente es la línea de alta velocidad París-Estrasburgo que ha pasado de velocidades de 300 km/h a 320 km/h. Este tipo de avances requieren que la calidad geométrica de la vía sea óptima, a fin de cumplir con los niveles de seguridad necesarios.

En España el coste de mantenimiento de las vías de alta velocidad ronda los 100.000 € por km/año<sup>[1]</sup>. Considerando que es el país con mayor longitud de vías de alta velocidad en Europa (más de 3.100 km en servicio), existe un gran interés en encontrar nuevas alternativas que contribuyan a reducir los costes asociados a la infraestructura ferroviaria.

La alta frecuencia de mantenimiento que requiere el balasto, la dificultad de disponer de áridos de alta calidad dependiendo de la zona de actuación y las problemáticas asociadas a las vibraciones inducidas por el paso de trenes, ponen de manifiesto que las innovaciones relacionadas a la capa de balasto son de vital importancia para acompañar los avances efectuados en la calidad de los servicios ferroviarios.

En este sentido y empleando materiales reciclables, se pueden obtener soluciones reales a los problemas existentes que a su vez contribuyan con una disminución de residuos.

### PALABRAS CLAVE

Balasto, neumáticos reciclados, abrasión, ruido y vibraciones, ensayos in-situ.

\* NEOBALLAST es una marca registrada

## ABSTRACT

Maintenance costs on ballasted tracks have increased significantly in recent decades as a result of increased commercial speeds, a recent example being the high-speed-line (HSL) Paris-Strasbourg went from a speed of 300 km/h to 320 km/h. Such innovations require that the geometric track quality be optimal, so as to meet the necessary safety standards.

In Spain the cost of maintenance for HSL is around € 100,000 per km/year<sup>[1]</sup>, and taking into consideration that it is the country with the greatest length of high-speed tracks in Europe (more than 3,100 km in service), there is great interest in finding new ways to help reduce the costs associated with the rail infrastructure.

The high frequency maintenance required for the ballast, the difficulty of obtaining high quality aggregates depending on the area of action, and the problems associated with the vibrations induced by passing trains reveal that innovations related to the ballast layer are essentials to accompany the progress made in the quality of rail services.

In this regard and using recyclable materials it is possible to obtain real solutions to the existing problems which in turn contribute to a reduction in waste.

## KEY WORDS

Ballast, end-of-life tyres, abrasion, noise and vibrations, in-situ tests.

## 1. INTRODUCCION

La necesidad de mantener la competitividad con otros medios de transporte, ha obligado al ferrocarril a profundizar en materia de investigación brindando soluciones que lo hagan más eficiente, principalmente reduciendo los costes relacionados al mantenimiento de la infraestructura.

A pesar de su elevado coste inicial<sup>[2]</sup>, la vía en placa se ha pronunciado como solución para reducir los elevados costes de mantenimiento de las infraestructuras ferroviarias. Contrariamente a lo esperado, la experiencia ha puesto de manifiesto que ésta tipología de vía también presenta dificultades en lo que respecta al mantenimiento y, por tanto, muchas veces termina siendo una alternativa más costosa que la vía en balasto. Existen también, otras alternativas más recientes que recurren al empleo de polímeros<sup>[4]</sup> y geotextiles<sup>[5]</sup> para reducir las tareas de mantenimiento, aunque éstos se encuentran en fase de investigación aún.

En base a ésta problemática detallada, se está llevando a cabo una investigación que consiste en recubrir los áridos con neumáticos fuera de uso, con el objeto de disminuir el deterioro que éstos experimentan y de reducir las vibraciones que generan los trenes a su paso, aumentando el área y disminuyendo la rigidez del contacto entre partículas. A éste árido recubierto se lo denomina Neoballast. El presente proyecto de investigación tiene origen a través del subprograma INNFACTO 2012 impulsado por el Ministerio de Economía y Competitividad y de los fondos FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional), y del cual forman parte: COMSA S.A., Universidad Politécnica de Cataluña, MAPEI S.A. y ADIF.

Con la finalidad de establecer un análisis comparativo entre el comportamiento del balasto natural y el balasto recubierto con polvo de neumático, se han llevado a cabo numerosos ensayos. Como punto de partida se realizaron los típicos ensayos de laboratorio para balasto (Los Ángeles, Micro-Deval, Resistencia al Sulfato Magnésico, etc), continuando con ensayos específicos de resistencia al fuego, y de comportamiento del material a altas temperaturas. A continuación se realizaron ensayos bajo carga constante (Corte Directo de Gran Tamaño) y ensayos de carga cíclica en escala real, como el llevado a cabo en el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICIM) de la ETS de Caminos, Canales y Puertos de Santander. El presente escrito se centrará principalmente en los resultados obtenidos en este ensayo, ya que representa prácticamente las condiciones de carga reales a las que la capa de balasto se encuentra sometida.

Asimismo, con la finalidad de testificar la resistencia del material bajo la acción de la bateadora, se ha realizado un ensayo de bateo el cual se ha llevado a cabo en las vías correspondientes del Puerto de Gijón.

## 2. METODOLOGIA DE EVALUACION DEL NUEVO MATERIAL

Con la intención de realizar un análisis completo del material se ha dividido la investigación en dos etapas. La etapa inicial de estudio tiene por objetivo caracterizar el comportamiento del árido como partículas aisladas, mientras que la segunda etapa estudia el comportamiento del material en su conjunto y la interacción entre las partículas que componen la capa de balasto.

Los resultados al ensayar los materiales como partículas aisladas nos brindan indicios de como se comportarán los mismos en la vía, sin embargo, la información obtenida al realizar ensayos como conjunto en escala real, nos permite estudiar el comportamiento prácticamente idéntico al que se encuentra sometido el balasto en condiciones reales.

Diversas investigaciones relacionadas con el comportamiento del balasto bajo cargas cíclicas, han puesto de manifiesto la influencia de la generación de finos en la menor durabilidad de la capa de balasto<sup>[6]</sup>. Debido a esto algunas administraciones han decidido renovar la capa de balasto cuando ésta alcanza un 30% de finos generados (Paul Godart, INFRABEL, RTSE Paris, Diciembre 2013).

## Ensayos de laboratorio.

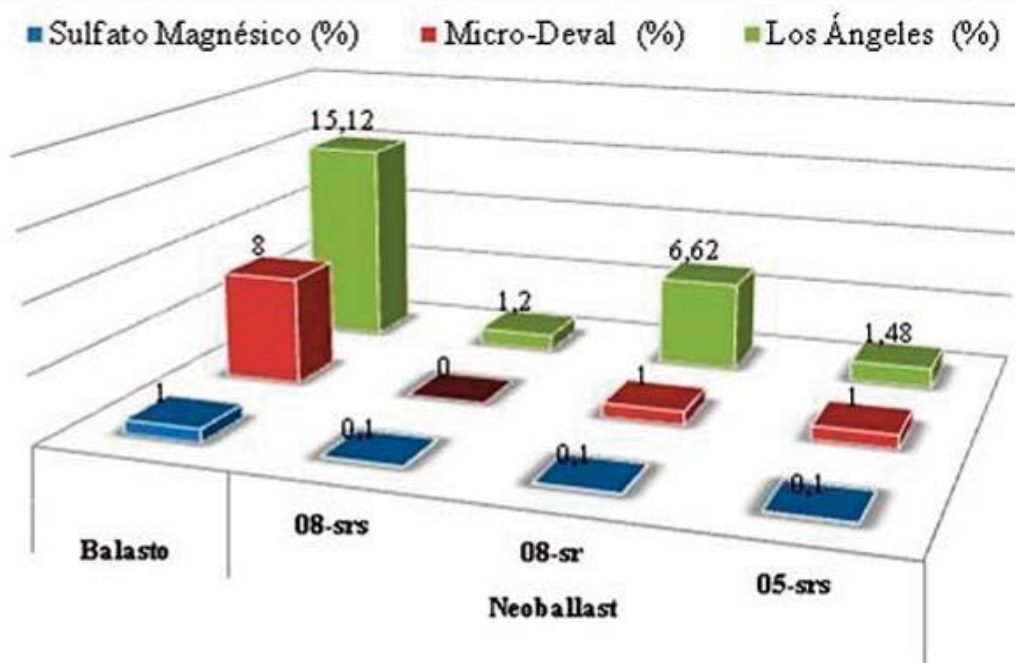
La primera etapa está compuesta por los ensayos de laboratorio clásicos para balasto definidos en la Normativa Europea UNE EN 13450, los cuales son:

- Ensayo de densidad de partícula y absorción de agua
- Resistencia a la Fragmentación por el método de Los Ángeles
- Ensayo Micro - Deval
- Ensayo de Resistencia al Sulfato Magnésico

Dada la muy baja porosidad de los áridos para balasto, en los ensayos de densidad de partícula y absorción de agua, no se han apreciado variaciones del árido recubierto respecto del natural. De todos modos, basándonos en los trabajos realizados Oldecop y Alonso<sup>[7]</sup>, se ha de destacar que al recubrir el árido se evita la formación de meniscos de agua en las fisuras, los cuales incrementan la velocidad de fragmentación de los mismos.

Respecto a los restantes ensayos realizados, los resultados obtenidos en el comportamiento del árido recubierto presentan mejoras significativas. La figura 1 resume los ensayos llevados a cabo para el árido natural y para tres muestras de árido recubierto a las cuales se les ha aplicado diferentes granulometrías de caucho y diversas metodologías de recubrimiento.

Figura 1. Ensayos de laboratorio realizados sobre balasto natural y Neoballast



Fuente: Elaboración propia.

Se han realizado tres tipologías de recubrimiento diferentes, con el objeto de definir cuál de ellos presentaba mejor comportamiento. Los resultados registrados para el ensayo más común sobre balasto (Ensayo de los Ángeles), han reflejado una reducción de hasta trece veces la fragmentación obtenida por el balasto recubierto respecto del balasto natural. Una tendencia similar también se aprecia en el ensayo Micro-Deval y en el ensayo de Resistencia al Sulfato Magnésico.

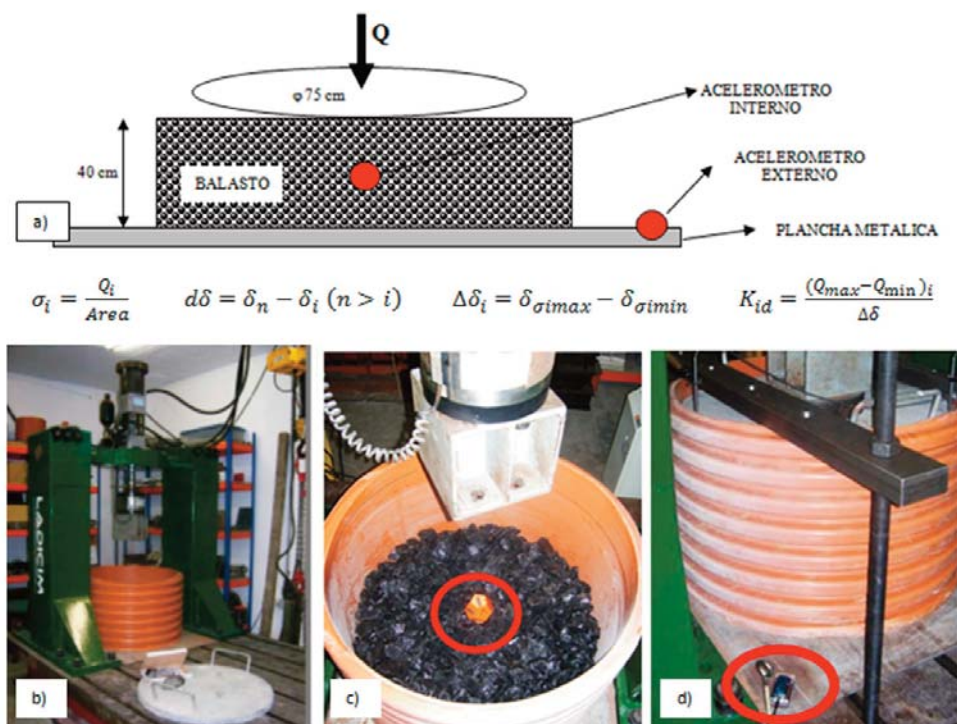
### Ensayo cíclico a escala real (LADICIM).

Una vez superada la etapa de los ensayos clásicos, se aborda el estudio del material en su conjunto. Para llevar adelante esta etapa se trabaja conjuntamente con el Departamento de Materiales de la Universidad de Cantabria, el cual posee una amplia experiencia en ensayos ferroviarios en escala real.

El ensayo de carga cíclica está conformado por una capa de balasto de 40 cm de espesor sobre el cual se dispone una placa circular de 75 cm de diámetro en la que se aplican las cargas (Figs. 2.a y 2.b). Se realizan un total de cuatro ensayos a fatiga, dos sobre balasto natural y dos sobre el balasto recubierto, variando la frecuencia de aplicación de carga. Cada uno de ellos se compone de un millón de ciclos de carga. Tomando como referencia un vehículo ligero típico español con una separación entre ejes de 22m, se ha definido una tensión vertical ( $\sigma$ ) de ensayo igual a 1,5 kg/cm<sup>2</sup> y frecuencias de aplicación de carga 2 Hz (160 km/h) y 5 Hz (396 km/h).

Otra importante problemática asociada al paso de vehículos ferroviarios por zonas urbanas es la generación de ruido y vibraciones<sup>[8]</sup>. Con el fin de cuantificar esta variable mediante el empleo de dos acelerómetros (Figs. 2.c y 2.d), uno interno (MSR 145, 0-50 Hz) y otro externo (MSR 165, 0-200 Hz), se han registrado las vibraciones propagadas al momento de la aplicación de los ciclos de carga.

Figura 2. Equipo empleado para llevar a cabo los ensayos cíclicos



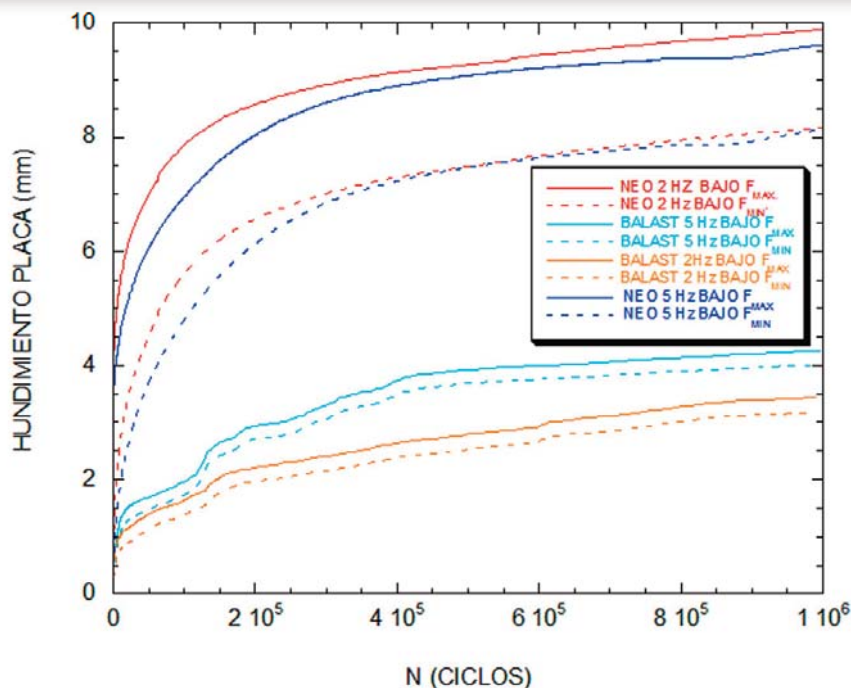
Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor interpretación de los resultados obtenidos a lo largo de los ensayos, se analizan los siguientes aspectos: el hundimiento y asiento diferencial, la amplitud carga-descarga y rigidez dinámica, y las vibraciones registradas.

### Hundimiento ( $\delta$ ) y asiento diferencial ( $d\delta$ ).

El hundimiento bajo cargas experimentado por el balasto recubierto (9,5 a 10 mm) es del orden de más del doble del observado sobre el balasto natural (3,5 a 4,2 mm). En la figura 3 se puede apreciar como en los primeros 250.000 ciclos se produce alrededor del 80 por ciento del hundimiento total para el balasto recubierto y el 65 en el balasto natural, éste fenómeno tiene explicación en la baja compactación inicial de la muestra dada su ejecución en el laboratorio y en la consecuente variación del comportamiento por encima de los 250.000 ciclos al estabilizarse el material.

Figura 3. Asiento acumulado de las muestras ensayadas a fatiga

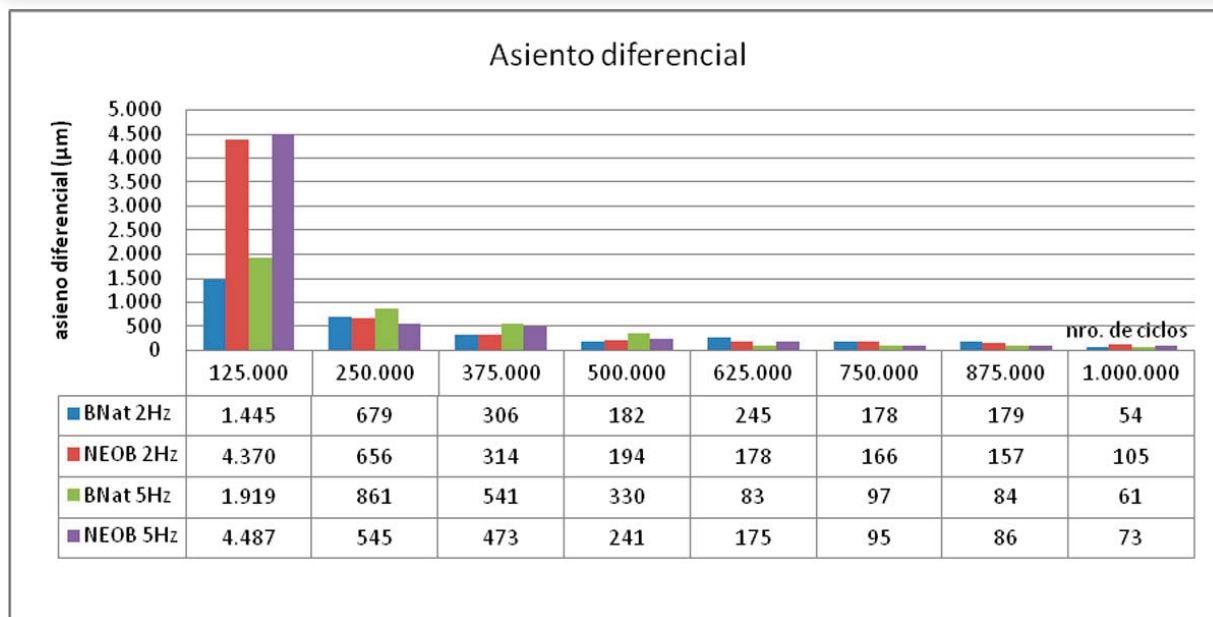


Fuente: Elaboración propia.

Otro factor a tener en cuenta que se deduce de la figura 3, es la evolución gradual de las curvas que corresponden al balasto recubierto respecto de las del balasto natural a medida que incrementa el número de ciclos. Las irregularidades de las curvas se corresponden con la rotura de partículas, lo cual produce un acomodamiento instantáneo del material y por consiguiente un asiento brusco en el conjunto.

Superado el umbral de los 250.000 ciclos, el cual se podría considerar como la fase de compactación, los asientos diferenciales que experimentan tanto el balasto natural como el recubierto se equilibran (Fig. 4), siendo del orden de 150-200  $\mu$ m cada 125.000 ciclos. Un ejemplo de la irregularidad en los asientos que experimenta el balasto natural por rotura de partículas es el incremento que se produce entre los 500 y 625 mil ciclos en el balasto natural a 2 Hz, mientras que el balasto recubierto decrece gradualmente.

Figura 4. Asiento diferencial de las muestras ensayadas a fatiga



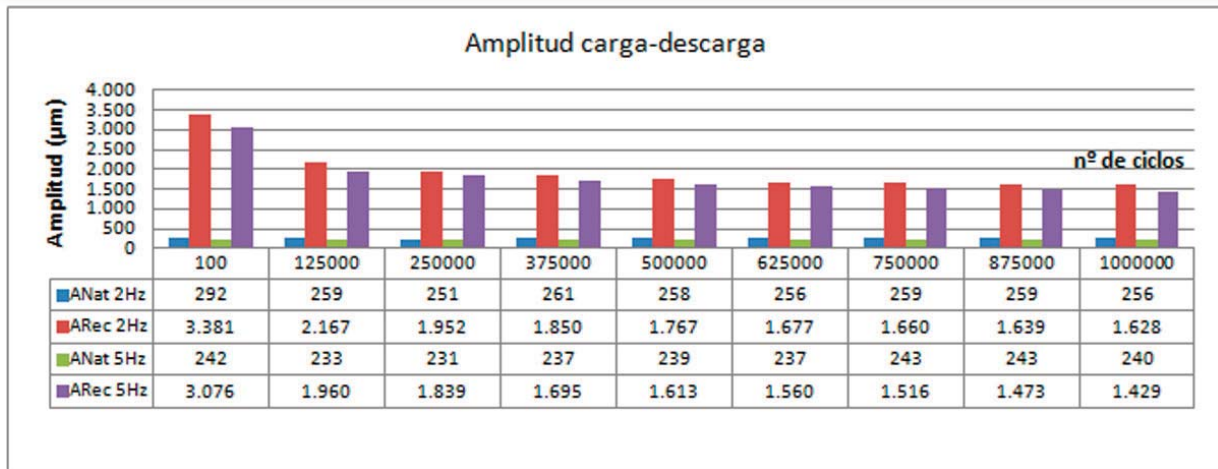
Fuente: Elaboración propia.

### Amplitud carga-descarga ( $\Delta\delta$ ) y rigidez dinámica ( $K_{id}$ ).

Una variable de gran interés en el conjunto carril-sujeción-travesía-balasto es la rigidez dinámica y las deformaciones que se producen entre ciclos de carga y descarga las cuales son determinantes en temas de seguridad relacionados al descarrilamiento. Se han realizado numerosos estudios respecto a la rigidez del conjunto<sup>[9]</sup>, y con el fin de disminuir la rigidez global de la vía se han incorporado diversos materiales como placas de asiento y mantas elastoméricas.

En nuestro caso nos hemos centrado en las deformaciones experimentadas por la capa de balasto. El espesor de la muestra ensayada ha sido de 400 mm, el cual se encuentra por encima de los 300 mm de balasto bajo travesía que se suele emplear en las infraestructuras ferroviarias. Tal y como se puede apreciar en la figura 5, una vez alcanzada la compactación del material, la amplitud entre carga y descarga para el balasto recubierto es del orden de siete veces mayor que la del balasto natural, disminuyendo esta relación a medida que aumenta en número de ciclos.

**Figura 5. Deformación experimentada entre carga y descarga de las muestras ensayadas a fatiga**



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar este mismo fenómeno desde la óptica de las rigideces dinámicas (tabla 1), las cuales para el balasto natural rondan los 230 a 250 kN/mm mientras que las correspondientes al balasto recubierto se sitúan en torno a los 30 a 35 kN/mm.

**Tabla 1. Rigideces estáticas y dinámicas, previas y posteriores a los ensayos de fatiga**

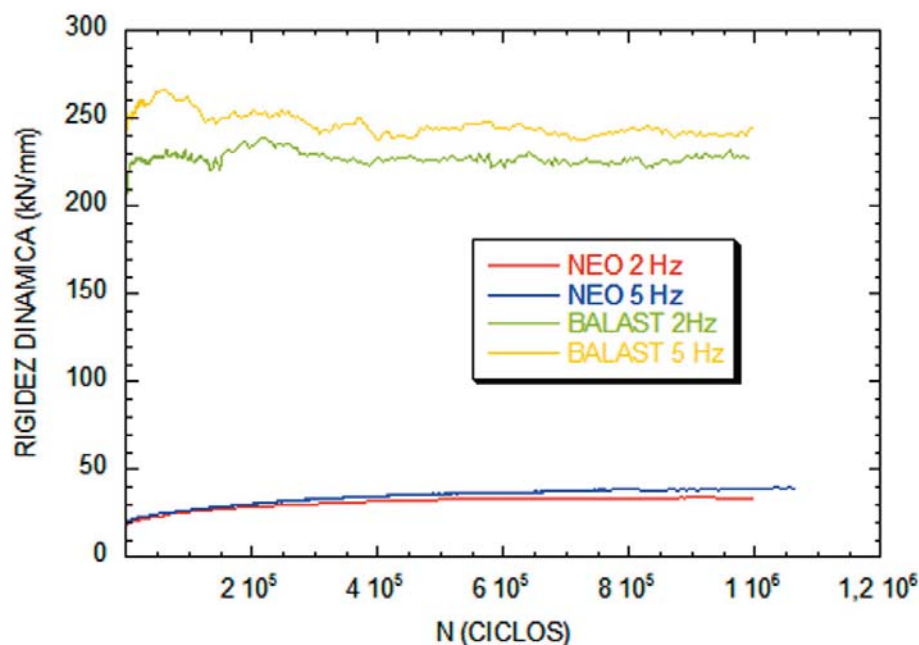
Ensayo	Rigidez Inicial	Estático			Dinámico		
		Previo	Posterior	Variación	Previo	Posterior	Variación
NeoB (2 Hz)	6,31	7,36	14,66	99,2%	17,51	31,27	78,6%
NeoB (5 Hz)	6,84	7,69	14,73	91,5%	19,43	34,11	75,6%
Balast (2 Hz)	64,85	150,38	173,07	15,1%	207,44	239,75	15,6%
Balast (5 Hz)	70,12	162,36	192,49	18,6%	230,4	250,75	8,8%

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en la irregularidad de las curvas de rigidez correspondientes al balasto natural de la figura 6, se puede apreciar el efecto de la rotura y acomodamiento de partículas descrito anteriormente.



Figura 6. Rigideces dinámicas de las muestras ensayadas a fatiga



Fuente: Elaboración propia.

El dotar de una mayor elasticidad a la capa de balasto ofrece una nueva posibilidad en lo que refiere al diseño de la infraestructura ferroviaria como, por ejemplo, poder prescindir de elementos adicionales que disminuyan la rigidez del conjunto carril-sujeción-traviesa-balasto.

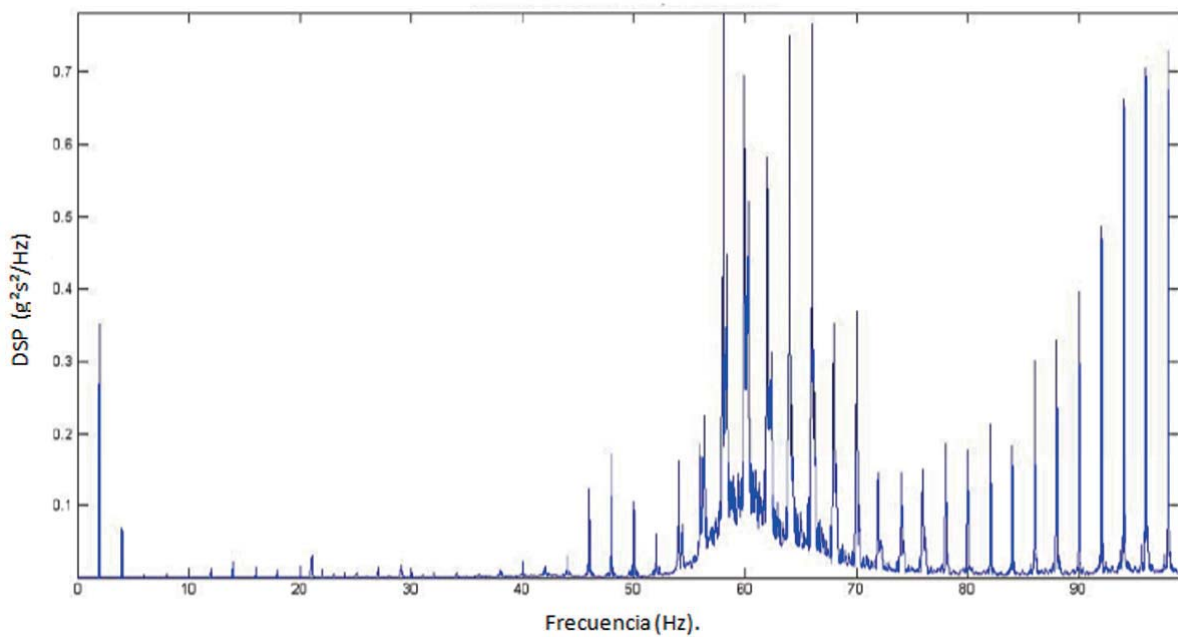
De este modo, considerando que la rigidez de la vía se encuentra determinada por todos los elementos que componen la infraestructura y, pudiendo variar el espesor de capa de balasto empleada, se podrían imponer rangos de rigidez deseados.

### Vibraciones.

Respecto del comportamiento del material frente a vibraciones, el amortiguamiento que produce el recubrimiento es sustancial. Los resultados más interesantes se han registrado en los ensayos realizados a 2 Hz y en las mediciones realizadas con el acelerómetro exterior, el cual posee un rango de medición de 0 a 200 Hz.

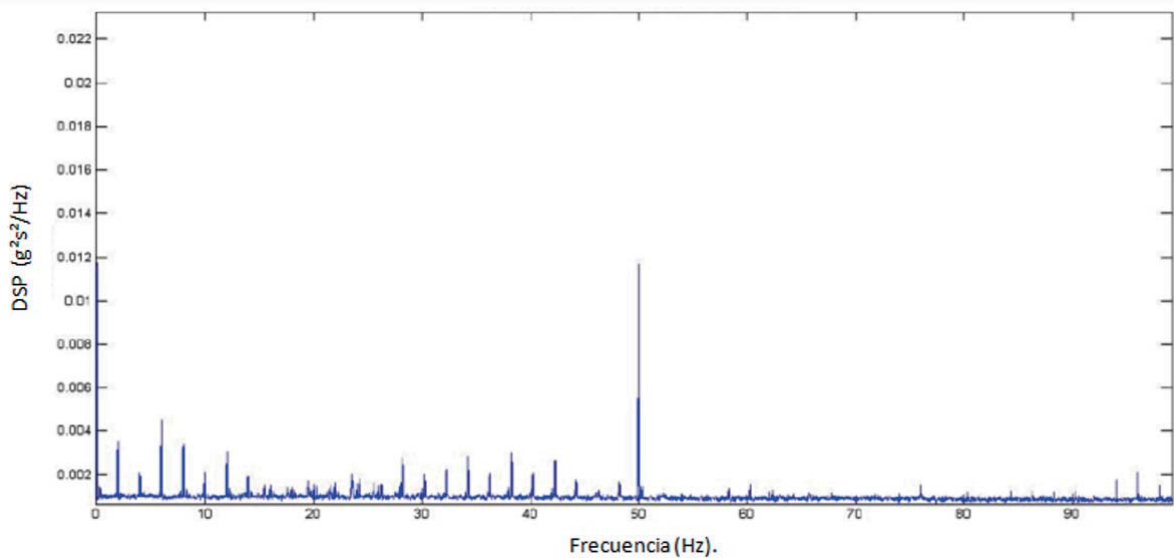
Como se puede apreciar de la comparativa de las figuras 7 y 8, la atenuación de las vibraciones que se encuentran en el rango de 50 a 100 Hz al emplear el balasto recubierto es prácticamente total en comparación a lo observado con el balasto natural, el cual alcanza valores máximos de  $0,7 \text{ g}^2\text{s}^2/\text{Hz}$ .

Figura 7. DSP de la señal en el eje z (Balasto natural a 2 Hz)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. DSP de la señal en el eje z (Balasto recubierto a 2 Hz)



Fuente: Elaboración propia.

De estudios realizados sobre propagación de vibraciones en la estación de Sants<sup>[10]</sup>, se deduce que las mayores intensidades de propagación se sitúan en rangos de 40 a 100 Hz, por tanto la correspondencia existente entre los resultados obtenidos del ensayo con los obtenidos en la situación real, nos permiten prever el efecto de amortiguación que la inclusión de el nuevo material tendrá al momento de implantarse en vía.

## Ensayo de bateo en el puerto de Gijón.

Con la intención de caracterizar el comportamiento del balasto recubierto bajo la acción de una maquina de bateo, se ha diseñado ensayo in situ mediante el cual se obtienen parámetros significativos del comportamiento del material y su comparación correspondiente con el balasto natural<sup>[11]</sup>. En la figura 9 se observa el grupo de bateo en funcionamiento durante la realización del ensayo, el cual estuvo compuesto por quince ciclos de bateo a 50 Hz para cada una de las muestras.

**Figura 9. Grupo de bateo Vaiacar V704 F+ en funcionamiento (50 Hz)**



Fuente: Elaboración propia.

A lo largo del ensayo se efectuaron dos registros de vibraciones en cada ensayo: uno interno y otro externo, empleado los mismos equipos que en los ensayos realizados en el LADICIM. La tabla 2 detalla las atenuaciones obtenidas al recubrir los áridos.

**Tabla 2. Registro de vibraciones durante el ensayo de bateo en el Puerto de Gijón**

	Balasto natural (sensor externo)	Neoballast® (sensor externo)	Balasto natural (sensor interno)	Neoballast® (sensor interno)	Atenuación (sensor externo)	Atenuación (sensor internos)
Eje X	0.042 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	0.021 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	27 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	8.9 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	-6 dB	-9.6 dB
Eje Y	0.0111 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	0.0109 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	47 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	14.2 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	-0.16 dB	-10 dB
Eje Z	0.041 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	0.027 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	20 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	5.5 g <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /Hz	-3.6 dB	-11 dB

Fuente: Elaboración propia.

Luego de finalizados los ciclos de bateo se tamizaron ambas muestras y se cuantificó el porcentaje de finos generados. Para el balasto natural se produjo un 1,06% de material fino (por debajo del tamiz 31,5mm), mientras que para el balasto recubierto no hubo generación de finos ni rotura de partículas.

En lo que respecta al deterioro de los áridos que componen la capa de balasto y su relación con la resistencia lateral de vía, Tutumler<sup>[12]</sup> ha realizado investigaciones en las que destaca que conservar la geometría inicial de los áridos a medida que bateamos favorece a mantener la resistencia lateral de la vía después del bateo.

### 3. CONCLUSIONES

Como se ha ido describiendo a lo largo del presente artículo, los resultados obtenidos a lo largo de los diversos ensayos son prometedores de cara a la obtención de soluciones para los presentes problemas en la vía en balasto. Los incrementos en la resistencia a la fragmentación en los niveles observados, prevén un incremento en la durabilidad de la capa de balasto significativa y por tanto, como describe Sadeghi, una sustancial repercusión en la calidad de la infraestructura.

Otra contribución positiva que la investigación introduce, es la referida a la propagación del ruido y las vibraciones en la infraestructura. El añadir un material elástico en el contacto entre partículas genera un amortiguamiento significativo en la transmisión de vibraciones y a la vez una reducción en el ruido generado por el golpeo entre partículas de balasto.

En materia medioambiental, la implementación del nuevo material tiene una repercusión de relevancia elocuente: una mayor durabilidad de la capa de balasto se traduce en una menor extracción de áridos de cantera, la reutilización de neumáticos fuera de uso evita que los mismos vayan a vertederos o incluso a plantas incineradoras que generan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, la impermeabilización de los áridos permite utilizar nuevamente áridos calcáreos como balasto, y la disminución del ruido favorece a una menor contaminación acústica.

El próximo y último paso que resta para la implementación de éste nuevo material en las infraestructuras ferroviarias, es el de la realización de un tramo de prueba de cien metros, en el cual nos encontramos trabajando en la actualidad.

## REFERENCIAS

- [1] Ubalde Claver, L., “La auscultación y los trabajos de vía en la línea del Ave Madrid - Sevilla: Análisis de la experiencia y deducción de nuevos criterios de mantenimiento” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.
- [2] CENIT, “Estudio del comportamiento a medio y largo plazo de las estructuras ferroviarios de balasto y placa” Barcelona, España, 2006.
- [3] <http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=15895&cs=inte>.
- [4] Woodward, P.K., Kennedy J. and Medero G., “Three-Dimensional Track Reinforcement using Polymer Geocomposites” Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh, UK, 2009.
- [5] Fischer, Sz. and Horvat, F., “Superstructure Stabilization of Ballast Bedded Railway Tracks with Geogrids” Szechenyi Istvan University, Hungary, 2011.
- [6] Indraratna, B., Nimbalkar, S. and Christie, D., “The performance of rail track incorporating the effects of ballast breakage, confining pressure and geosynthetic reinforcement” University of Wollongong, Australia, 2009.
- [7] Oldecop, L. A. and Alonso E. E., “Suction effects on rockfill compressibility”, *Géotechnique* Vol 53, No. 2, 289-292, 2003.
- [8] López Pita, A., “Infraestructuras Ferroviarias”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2006.
- [9] Fonseca Teixeira, P., “Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.
- [10] Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña “Determinación de las vibraciones en las vías próximas al futuro hotel Sants originadas por la circulación del ferrocarril”., Barcelona, España, 2005.
- [11] Paderno, C., “Comportement du ballast sous l’action du bourrage et du trafic ferroviaire” These N°4697, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse, 2010.
- [12] Tutumluer, E., Huang, H., Hashash, Y. and Ghaboussi J., “Aggregate Shape Effects on Ballast Tamping and Railroad Track Lateral Stability”, University of Illinois at Urbana Champaign , Illinois, 2006.
- [13] Sadeghi, J. and Askarinejad, H., ”Influences of track structure, geometry and traffic parameters on Railway Deterioration”Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2007.



# Propuesta de Aplicación de una Red Eléctrica Inteligente “Smart-Grid” a la Red Eléctrica Ferroviaria Española

## *Application of a Smart Grid to the Spanish Electrical Railway*

---

Israel Herrero Sánchez\*

---

### RESUMEN

El proyecto Smart-Grid, surge con el objetivo de mejorar la eficiencia y la fiabilidad de la red eléctrica, adaptándola a las necesidades de la era digital. Las tecnologías denominadas Smart Grid disminuirán las emisiones de carbono mediante la gestión de la demanda de energía eléctrica. Además del beneficio medioambiental, su implementación mejorará la eficiencia de las redes de transporte y distribución permitiendo la integración de fuentes de energía renovable.

El sector ferroviario es un consumidor importante del sistema eléctrico de un país por lo que su aplicación al mismo, redundará en una mejora global de todo el sistema eléctrico ferroviario. En este estudio, se propone una aplicación de un sistema Smart Grid a la red eléctrica ferroviaria española con sus particularidades, adaptada a las instalaciones actuales y a cómo sería su aplicación. También se refleja la implantación de nuevos nodos en la red, como la incorporación del vehículo eléctrico a usar en las plataformas de mantenimiento de la infraestructura.

### PALABRAS CLAVE

Eléctrico de Potencia (SEP), Smart Grid, Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente (REFI), Nodo, RAD - Red de Acceso a Datos, Red de Transporte, IP-MPLS, Sistemas ATP y Eficiencia Energética.

---

\* iherrerosa@gmail.com Ingeniero Técnico Industrial - UPCO - ICAI, PMP®, Master Universitario en Gestión de Infraestructuras y Sistemas Ferroviarios - UEM.

Premio Unión Interprofesional de la Comunidad de Madrid a las 3 mejores comunicaciones sobre proyectos de I+D+i relacionados con el desarrollo sostenible, por el proyecto fin de master “Aplicación de una red Eléctrica Inteligente (Smart-Grid) a la Red Eléctrica Ferroviaria Española”, presentado a través del COITIM. - Noviembre 2.014.

---

## **ABSTRACT**

The Smart-Grid project is created with the objective of improving the efficiency and reliability of the grid, adapted to the needs of the digital age. This type of technologies will decrease carbon emissions by managing the demand of electricity. In addition to the environmental benefits, its implementation will improve the efficiency of transmission and distribution allowing the integration of renewable energy sources.

The railway sector is a major consumer of electrical system of a country so its application will redound in an overall improvement of all rail electric system. This piece brings out an application of a Smart Grid system to the Spanish railway power grid with its peculiarities, adapted to modern facilities and how would it be applied. The introduction of new network nodes is also shown, as the incorporation of electric vehicles to be used in the maintenance platforms infrastructure.

## **KEY WORDS**

Power electric System (SEP), Smart Grid, REM-S Railway Energy Management System, Node, FAN - Field Area Network, WAN - Wire Area Network, IP/MPLS, ATP Systems, and Energy Efficiency.



## 1. INTRODUCCIÓN

La red eléctrica es posiblemente el sistema interconectado más extenso del planeta. Durante más de un siglo ha estado íntimamente ligada al desarrollo tecnológico y ha cumplido con su cometido a la perfección. Ha permitido entregar la energía producida, instantánea y permanentemente, con unos costes reducidos y una robustez y fiabilidad encomiables.

En este artículo se expone de forma resumida la posible aplicación de las redes eléctricas inteligentes “Smart-Grid” a la Red Eléctrica Ferroviaria Española. En dicha aplicación, se interconectan a la Red Eléctrica Ferroviaria diferentes tecnologías en fase de implantación tales como el aprovechamiento de la energía de frenado de los trenes, la posibilidad de conexión del vehículo eléctrico a la red (flota de mantenimiento del administrador ferroviario), y la posibilidad de conexión de instalaciones de energías renovables, creando lo que se conocería como una Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente.

Entre otros esquemas de funcionamiento, una red eléctrica inteligente ferroviaria podría tratar de consumir lo menos posible de la red eléctrica general, y de que todo el conjunto eléctrico ferroviario, sea lo más autosuficiente posible. Se espera que las Smart Grids aporten en el futuro una capa superior de control de los elementos anteriores optimizando la eficiencia del sistema demanda-generación en su conjunto.

El sector ferroviario es un consumidor importante del sistema eléctrico de un país, pues en el caso de España, representa el primer consumidor de energía eléctrica del sector servicios. Aun en su condición de consumidor, el ferrocarril tiene características especiales de consumo; por ejemplo, su curva de carga es muy irregular (lo que produce ciertos problemas a los suministradores eléctricos, ya que existen gran cantidad de puntas). Otra característica importante es que, sin ser considerado un consumidor crítico, sí es relevante el hecho de no interrumpir la explotación ferroviaria en servicios concretos, como es el caso de las redes de Cercanías o de Alta Velocidad, que suelen ser empleados por una gran cantidad de usuarios. Este hecho es uno de los que supone que la no interrumpibilidad del servicio sea una exigencia actual a las compañías eléctricas.

Por ello, los administradores ferroviarios se están planteando cuál podría ser el escenario eléctrico ferroviario considerando la adopción de las pautas establecidas por las redes inteligentes. Estas pautas indican que las mejoras y beneficios en las redes eléctricas ferroviarias podrían ser importantes si se consideran ciertos aspectos técnicos.

Para analizar las ventajas de la interconexión de redes (ferroviarias entre sí y ferroviarias con públicas), la reducción de las pérdidas por nuevas topologías y consistencias de las redes; del desarrollo de sistemas de almacenamiento embarcado y en tierra, se han llevado a cabo diversos proyectos de investigación en el ámbito español y europeo. Actualmente se han desarrollado en esta línea los proyectos FERROSMARTGRID (desarrollo de la primera red inteligente para la gestión energética del sector ferroviario) y MERLIN (investigación y demostración de la viabilidad de un sistema de gestión integrada para lograr un uso más sostenible y optimizar la energía en los sistemas europeos principales de tren eléctrico).

Dentro del proyecto MERLIN, se han creado cinco escenarios diferentes que han evaluado como mejorar la gestión de la energía, aportando soluciones que ayudan a una gestión más eficiente mediante mejoras significativas en la subcontratación de potencia, energía consumida así como en los costos obtenidos en la mayoría de los casos. Estos 5 escenarios se han evaluado en la alta velocidad, mercancías, regionales, cercanías y escenarios de tráfico mixto de mercancías-pasajeros. En este proyecto, el modelo de arquitectura Smart Grid (SGAM - Smart Grid Architecture Model) se ha utilizado como una referencia para el desarrollo del REM-S (Railway Energy Management System) adaptando el enfoque arquitectónico de una SGAM al sistema eléctrico ferroviario.

La implantación de las Smart Grid en el entorno ferroviario requiere de la instalación de sistemas de IT que lleven a cabo las optimizaciones y el control inteligente del sistema ferroviario, modificaciones en los procedimientos de operación así como en las regulaciones para permitir un nuevo tipo de servicios en gestión de energía.

En resumen, una red Smart Grid es una red que integra de manera inteligente las acciones de los usuarios que se encuentran conectados a ella - generadores, consumidores y aquellos que son ambas cosas a la vez - con el fin de conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible. Su aplicación al sector ferroviario, lo haría más eficiente y favorable al medioambiente, permitiendo una operación con mayor fiabilidad y seguridad.

En el apartado 1 o Introducción, se describe el objetivo, alcance y posible aplicación del documento. En el segundo apartado, Caracterización del Nuevo Sistema, se detalla la nueva configuración que se propone para el sistema eléctrico ferroviario con la aplicación del concepto de red eléctrica inteligente.

En el apartado 3, se detalla una propuesta del nuevo sistema eléctrico ferroviario especificando los nodos que la constituyen, la nueva estructura de comunicaciones y los diferentes tipos de red que se proponen. En el apartado 4, se detallan la integración de los nuevos desarrollos tecnológicos a la nueva red REFI que se propone.

Finalmente el apartado 5 de Conclusiones, hace un resumen de las principales conclusiones relativas a la aplicación de las redes inteligentes “Smart Grid” a la red eléctrica ferroviaria.

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL NUEVO SISTEMA ELÉCTRICO FERROVIARIO

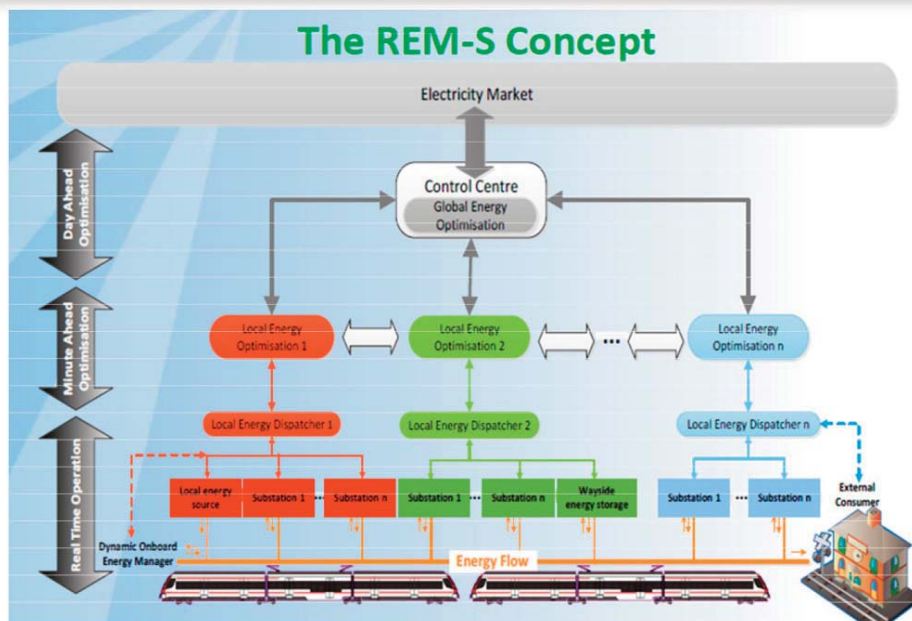
La mejora del control sobre las redes eléctricas ferroviarias se puede lograr con tecnologías Smart Grid. Para gestionar el tráfico y la electrificación de forma conjunta y en la misma dirección, una Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente (REFI) puede resolver problemas de operación (limitaciones de capacidad, cambios en la operación, etc...) incluyendo aspectos que no pueden ser direccionados dentro de los esquemas de control habituales. Por eso, la REFI integrará la misión ferroviaria y la electrificación.

Otro aspecto que debe tratar la red eléctrica ferroviaria inteligente es la posibilidad de considerar la interrumpibilidad eléctrica de la red en caso que el operador técnico del sistema lo considere necesario. Actualmente este hecho no es considerado por el administrador ferroviario, pudiendo producir diversos problemas técnicos en el sistema como por ejemplo la necesidad de seguir alimentando las instalaciones ferroviarias desde una segunda fuente de energía (al quedar desconectada la catenaria).

En esta nueva funcionalidad, entran en juego determinados aspectos que se detallan a continuación:

1. Operación Eléctrica Ferroviaria en entorno Smart; la nueva REFI controlará el flujo de energía que se envía a la red procedente de las subestaciones de tracción, y tendrá en cuenta el estado del resto de nodos que participan en ella. Este control de flujos ayudará a lograr los propósitos de la REFI ayudando a minimizar pérdidas, reducir el coste de la electricidad (parte de la energía demandada será suministrada por otras fuentes en otros nodos de control), etc... Estos flujos de energía serán ajustados generando una mejora significativa del sistema. Bien es cierto, que este proceso será complejo de gestionar debido a que las conducciones están sometidas a fuertes restricciones por el operador relativas a la calidad del servicio al viajero. En el proyecto MERLIN se han propuesto recomendaciones técnicas que describen la arquitectura REM-S (nueva REFI), incluyendo funciones y capas de componentes, así como el tipo de elementos de los diferentes subsistemas de una línea base en un sistema ferroviario.

Figura 1. Concepto REM-S



Fuente: MERLIN Final Conference

2. Penetración e implantación de nuevas tecnologías y sistemas en la REFI (Subestaciones Eléctricas Reversibles, Sistemas de Almacenamiento, Energías Renovables, Ferrolineras, etc...); permitiendo dotar a la misma de una mayor independencia del Operador del Sistema Eléctrico, y contribuyendo así con criterios medioambientales.
3. La interrelación de la Red Eléctrica Ferroviaria (SEP ferroviario) con el Operador del Sistema Eléctrico a través de la Red de Transporte o Red de Distribución (SEP General), es primordial en el funcionamiento del nuevo sistema, ya que ambas están directamente conectadas, y gran parte de la demanda de energía eléctrica del sector ferroviario, seguirá siendo proporcionada por el operador del sistema eléctrico correspondiente. Conforme a la situación instantánea del mercado eléctrico, podrá ser más interesante almacenar energía, devolverla a la red, producir parte de la misma en la nueva Red, etc...En las recomendaciones del proyecto MERLIN, se ha propuesto establecer la estandarización del intercambio de información entre los agentes, su formato y contenido, la secuencia de mensajes y su periodicidad dada la complejidad de la interrelación entre el SEP ferroviario con el SEP general.
4. La conducción del Tren en un entorno Smart, mediante el desarrollo de planes de conducción económica donde cada tren será un nodo más en la nueva REFI. Su posición, su dirección, su necesidad energética en la conducción, será conocida en todo momento por el sistema. Esto permitiría que se realice una gestión mucho más activa de la demanda energética de los trenes, a través de una conexión entre el SEP general con los sistemas ATP y herramientas de planificación y control de itinerarios, de forma que se permita el control de trenes en función de la energía consumida. En la actualidad, esto no es posible pero una REFI debe permitir alcanzar este objetivo para conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible.

No hay que olvidar la integración de la red Smart-Grid en el entorno urbano, donde existe una mayor densidad de tráfico, por lo tanto mayor número de arranques y frenados, y se generan más oportunidades de reaprovechar y gestionar la energía eléctrica regenerada. Teniendo en cuenta que en líneas metropolitanas, el nivel de automatización en el control de tráfico en tiempo real es mayor, esto facilitaría la implantación de este tipo de redes en el entorno urbano.

### 3. CONFIGURACIÓN DE LA NUEVA RED ELÉCTRICA FERROVIARIA

Esta descripción es una propuesta a lo que sería la configuración del nuevo sistema eléctrico ferroviario con la aplicación de las tecnologías Smart Grid.

#### Nodos de Comunicación. Agrupación de Nodos.

La agrupación de nodos en un entorno local (decenas de kilómetros) constituirá una red FAN (Field Area Network). Estas subredes de nodos dentro de la REFI se interconectarán entre si formando una red de nivel superior o red WAN (Wide Area Network). Por tanto la nueva Red, se constituirá mediante un conjunto de nodos interconectados todos ellos entre sí, agrupados en diferentes modos o arquitecturas de red. (Redes FAN y WAN).

Para la nueva REFI, se definen diferentes tipos de nodos que se enumeran a continuación:

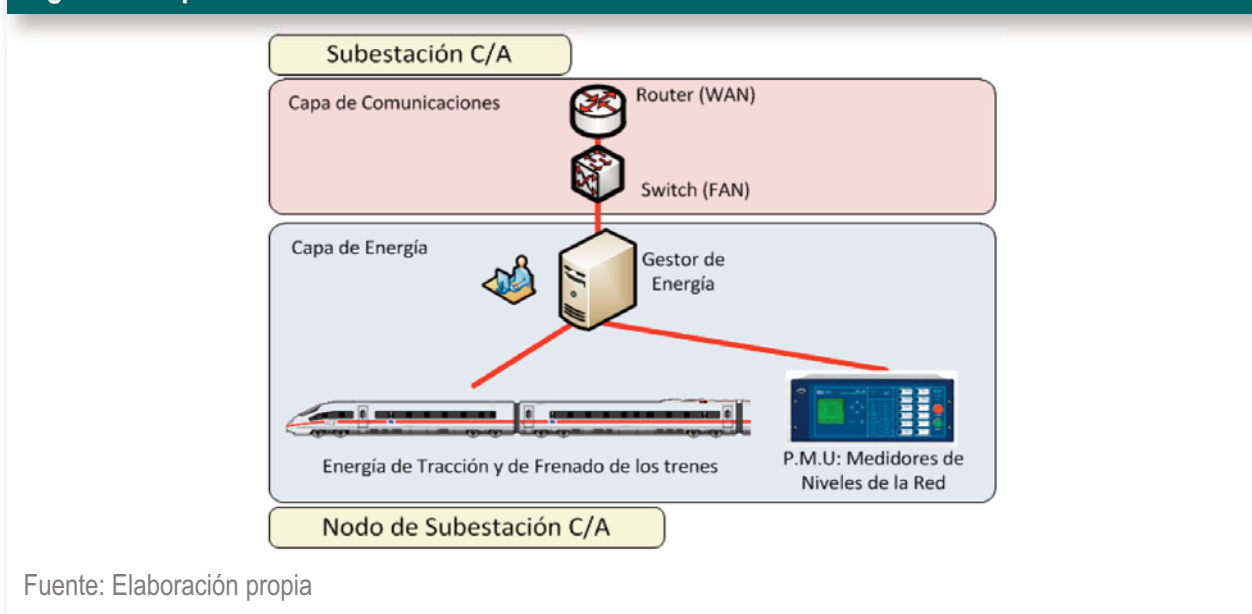
#### Nodos de Subestación.

Los nodos de subestación, realizan la medida de potencia y energía en la subestación. Dispondrán de comunicación con el sistema de gestión de energía del operador del sistema eléctrico (SEP general), y con el sistema de gestión de energía de la nueva REFI. Este tipo de nodo, gestiona los flujos de energía entre el operador del sistema eléctrico y la nueva REFI. Estos nodos se consideran “nodos centrales de operación” pues en ellos se establece una conexión a una red de nivel superior (conexión a red WAN).

Dentro de este tipo, diferenciaremos dos casos generales:

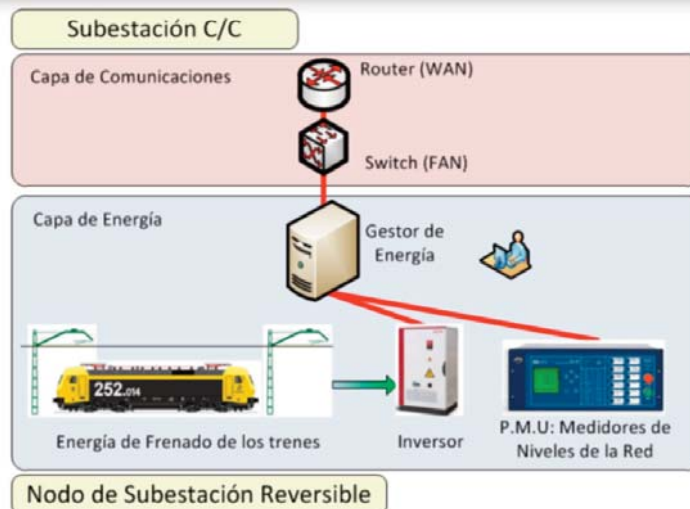
- Subestación de tracción CA: subestación de tracción de corriente alterna, ya de por si con función reversible (devolución directa de la energía de frenado de los trenes a la red eléctrica).

Figura 2. Esquema de Nodo de Subestación de CA



- Subestación de tracción CC o Subestación Reversible: esta subestación incorpora un equipamiento adicional (dispositivo inversor) que le permite devolver la energía regenerada a la red de distribución del operador del sistema eléctrico que suministra energía a dichas subestaciones.

Figura 3. Esquema de Nodo de Subestación de CC



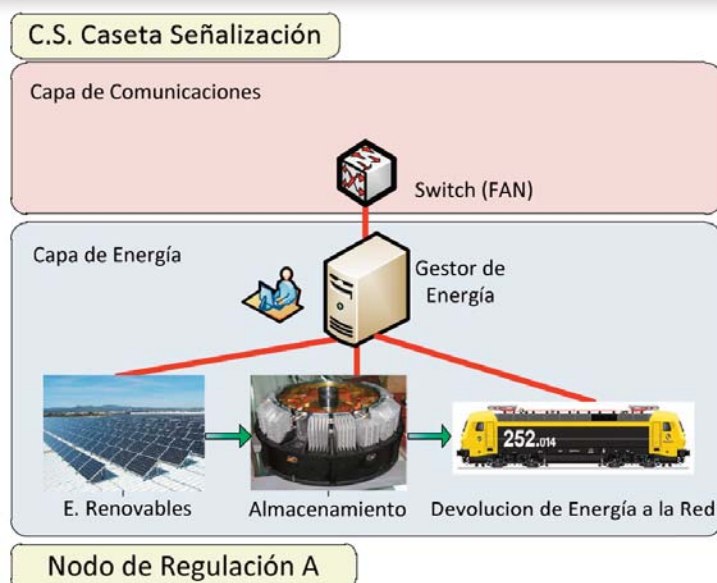
Fuente: Elaboración propia

### Nodo de Regulación.

Los nodos de regulación posibilitan la gestión de la energía mediante un sistema de almacenamiento de energía y la integración de energías renovables. Disponen de comunicación con el sistema de gestión de energía de la nueva REFI. Se diferencian dos tipos de nodos de regulación:

- **Nodo de Regulación Tipo A:** estos nodos se configuran para albergar sistemas de integración de energías renovables con sistemas de almacenamiento de energía, orientados a la devolución de energía a la red eléctrica ferroviaria.

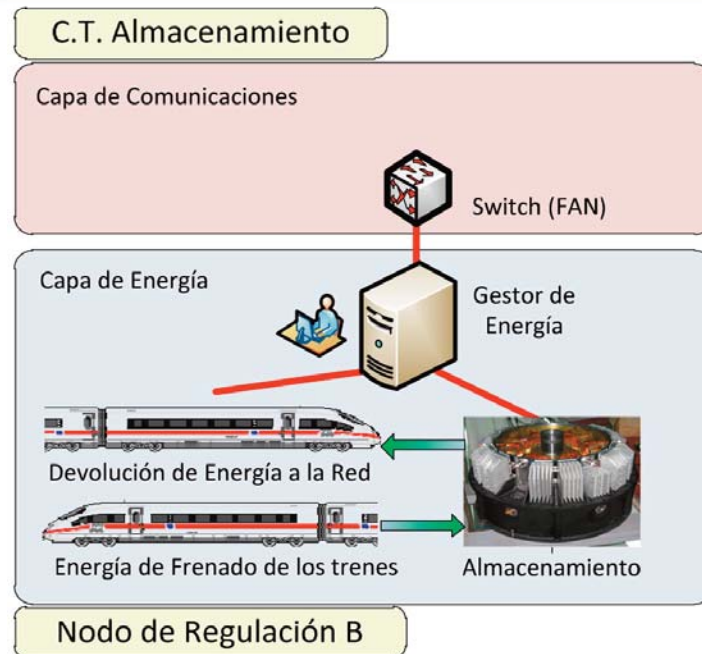
Figura 4. Esquema de Nodo de Regulación Tipo A



Fuente: Elaboración propia

- **Nodo de Regulación Tipo B:** este tipo de nodo, se configura para albergar tan sólo sistemas de almacenamiento de energía, orientados a la captación y devolución de la energía a la red eléctrica ferroviaria.

**Figura 5. Esquema de Nodo de Regulación Tipo B**



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1, se numeran diferentes tipos de ubicaciones donde se dispondrían los nodos de regulación:

**Tabla 1. Ubicaciones para Nodos de Regulación**

UBICACIÓN DE NODOS DE REGULACIÓN	DESCRIPCIÓN / OBSERVACIONES
Calefacción de Agujas (Tipo A)	Alimentación 25 kV/230 V para uso exclusivo de calefacción de agujas en alta velocidad.
Casetas de Señalización (Tipo A)	Alimentación de los servicios de señalización de la línea ferroviaria.
Casetas de Túnel (Tipo A)	Alimentación de los servicios de iluminación y seguridad de los túneles.
Sistemas de Almacenamiento (Tipo B)	Sistemas de Almacenamiento en Tierra, distribuidos por toda la línea eléctrica ferroviaria.

Fuente: Elaboración propia

## Nodo de Interoperabilidad.

Los nodos de Interoperabilidad, posibilitan la gestión de la energía mediante un sistema de almacenamiento de la misma, la integración de energías renovables y la integración de carga para otros modos de transporte, principalmente flota de vehículos de mantenimiento del administrador ferroviario. Estos nodos integran las denominadas Ferrolíneas o punto de recarga para vehículos eléctricos. De aquí su nombre de “interoperabilidad”. Al igual que los anteriores, disponen de comunicación con el sistema de gestión de energía de la nueva REFI.

**Figura 6. Esquema de Nodo de Interoperabilidad**



Fuente: Elaboración propia

En estos nodos, se procederá a instalar los servidores de gestión de usuarios de vehículos eléctricos, así como para los puntos de recarga para dichos vehículos. Estos nodos, también se consideran “nodos centrales de operación” es decir, aquellos donde se establece una conexión a una red de nivel superior (conexión a red WAN).

**Tabla 2. Ubicaciones para Nodos de Interoperabilidad**

UBICACIÓN DE LOS NODOS DE INTEROPERABILIDAD	DESCRIPCIÓN / OBSERVACIONES
Edificios Técnicos	Edificios Técnicos para PAET, PBL (banalización), etc.
Estaciones de Viajeros	Edificios Técnicos de Estaciones y Apeaderos
Bases de Mantenimiento	Edificios o bases de mantenimiento del Administrador Ferroviario.
Centros de Control	Centros de Control Ferroviario (CRC, CTC, CPS)

Fuente: Elaboración propia

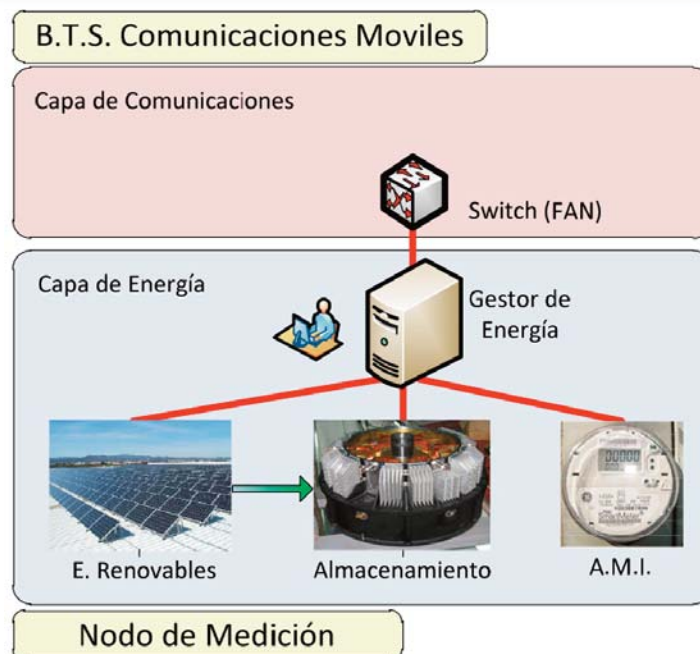
En la tabla 2, se numeran diferentes tipos de ubicaciones donde se dispondrían los nodos de interoperabilidad.

### Nodo de Medición.

Los nodos de medición, en general realizan la medida del flujo de potencia y energía en su ubicación, y dispondrán de comunicación con el sistema de gestión de energía de la nueva REFI. Incorporan dispositivos AMI (infraestructura de medida avanzada), que permitirán la lectura del flujo de la energía de cada nodo.

Estos nodos estarán habilitados para poder incorporar la integración de energías renovables y sistemas de almacenamiento generando puntos de “microgeneración” en la red.

Figura 5. Esquema de Nodo de Regulación Tipo B



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3, se numeran diferentes tipos de ubicaciones donde se dispondrían los nodos de medición:



**Tabla 3. Ubicaciones para Nodos de Medición**

UBICACIÓN DE LOS NODOS DE MEDICIÓN	DESCRIPCIÓN / OBSERVACIONES
Casetas de Detectores	
Casetas de Comunicaciones Móviles (BTS)	Casetas de Comunicaciones Móviles GSM-R.
Casetas de Operadores	Casetas de Operadores de telefonía pública.
Autotransformadores (ATI)	Autotransformadores en instalaciones en C/A de 2 x 25 kV.

Fuente: Elaboración propia

### Nodos Móviles.

Los nodos móviles serán participantes de las diferentes subredes por las que transiten dentro de la REFI. Estos nodos se corresponden con el material rodante y serían muy similares a los nodos de medición (medida del flujo de energía y comunicación con el sistema de gestión de la nueva REFI). Se trata de nodos generadores y consumidores de energía que podrían recibir órdenes relacionadas con la demanda de energía al instante, para contribuir si fuera posible, a la mejora o ajuste de la oferta disponible. Dispondrán de comunicación directa con la red fija vía GSM-R y contribuirán al desarrollo de la REFI.

### Estructura de Comunicaciones para la nueva REFI.

Las comunicaciones de la nueva REFI se apoyarán en las redes de telecomunicación que se encuentran repartidas por toda la red ferroviaria. Esto hace que para la nueva configuración de Red eléctrica ferroviaria Smart Grid, las redes de telecomunicación actuales puedan ser utilizadas para el desarrollo de todas las comunicaciones entre los diferentes nodos. Las redes de telecomunicaciones solidarias a la REFI estarán constituidas por tres niveles básicos:

Un nivel Físico o de conectividad.

Un nivel de Red y transmisión de datos.

Un nivel de servicios.

Estos criterios guardan relación con la pila de comunicaciones del modelo OSI.

El nivel físico o soporte de transmisión de esta red estará formado por anillos de cables de fibra óptica. Si nos centramos primero en el concepto de anillo, esta arquitectura nos permite ofrecer siempre caminos alternativos y redundantes para la transmisión entre dos puntos. La fibra óptica se ha convertido en la infraestructura óptima para establecer los enlaces que unen los nodos de comunicaciones.

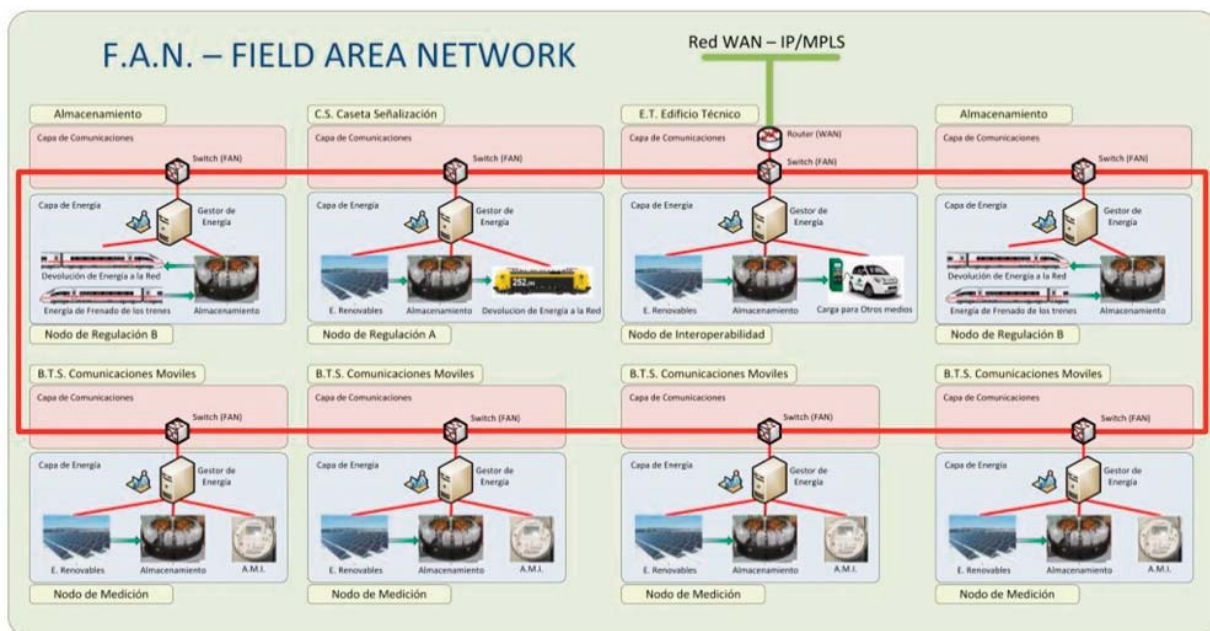
Por ello se define una arquitectura en dos niveles: Red de Acceso de Datos, de suficiente capacidad de transmisión para la demanda de servicios requeridos y basados en el protocolo de comunicaciones IP (IPv6); el segundo nivel lo conforma una Red de Datos de Explotación, con ancho de banda capaz de soportar la agregación de información proveniente de la red de acceso, y con tecnología MPLS.

### Red “Field Area Network” FAN (Red de Acceso de Datos).

Las redes FAN en la nueva configuración de REFI, serían equivalentes en cuanto a funcionalidades a las redes de Acceso de Datos (RDA) en las últimas tecnologías de telecomunicaciones aplicadas a la Alta Velocidad.

Se trata de una topología en anillo con acceso a la transmisión de todos los nodos de las líneas ferroviarias. Toda fuente de datos, se conecta a un puerto de acceso de los equipos de esta red, que se conforman mediante switches con funcionalidades en los niveles 2 y 3 de la capa OSI. Algunos de estos puertos, se emplean para realizar enlaces ópticos para establecer comunicación con los nodos de acceso colaterales.

Figura 8. Topología de la Red “Field Area Network – FAN”



Fuente: Elaboración propia

Para este perfil de comunicación, se establecerá un direccionamiento IPv6 debido al gran número de fuentes que pueden ser conectadas. Entre estas fuentes, se puede dar servicio a sistemas Smart Metering (equipos de medición y control), FLIR (Fault Location, Registration, Isolation and Restoration), acumuladores de energía (EHV), respuesta a la demanda, regulación de tensión y generación distribuida, etc...

El diseño en anillo de esta red FAN, tiene una configuración física con redundancia de caminos. Los nodos de acceso de la red FAN, disponen de un puerto de gestión local por consola y la posibilidad de acceder a ellos vía gestión remota. El operador monitoriza constantemente el estado de la red para analizar posibles problemas de caída de servicio por fallo en algún elemento.

## Red “Wire Area Network” WAN (Red de Transporte).

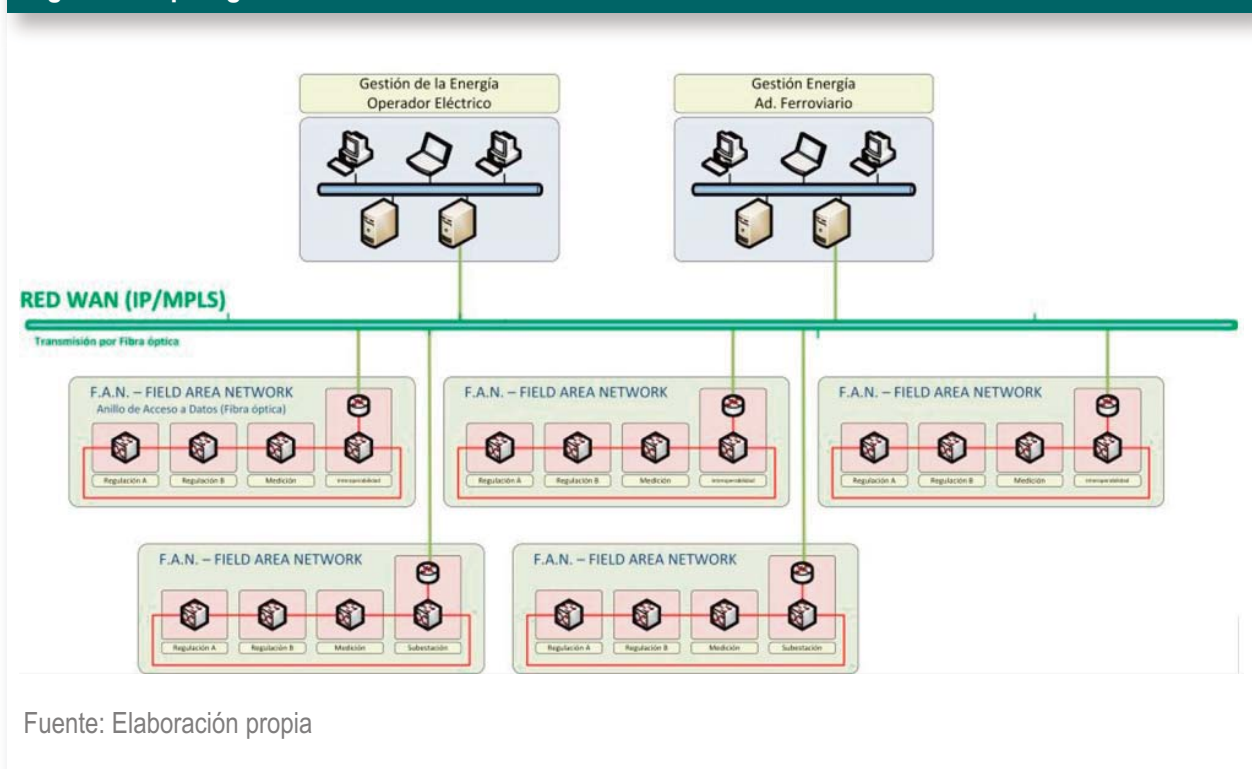
La red WAN representará el backbone de las anteriores redes FAN de datos. Dispondrá de una configuración de enlaces ópticos con capacidad ajustada a las necesidades de servicios y sustentada en el protocolo de comunicaciones MPLS (Multiprotocol Label Switching). Tiene como función servir de medio de transporte a largas distancias de la información recogida en los nodos de acceso de comunicaciones (redes FAN).

Los equipos que conforman la red son routers con elevada capacidad de conmutación y sin un elevado número de puertos eléctricos. Establecen enlaces ópticos de larga distancia con los nodos colaterales de la red WAN (redes FAN), y enlaces ópticos de corta distancia o eléctricos con los switches de las redes FAN del propio emplazamiento.

Para este perfil de comunicación, también se establecerá un direccionamiento IPv6.

A esta red WAN, también se unirían los sistemas de gestión de la energía del Administrador Ferroviario, así como del Operador del Sistema Eléctrico. De esta forma, la REFI controla todo el flujo de energía que se envía y se recibe de la red, y dota a la misma de un alto grado de automatización y control.

Figura 9. Topología de la Red “Wire Area Network – WAN”



## 4. NUEVOS DESARROLLOS TECNOLÓGICOS A IMPLEMENTAR EN LA NUEVA REFI

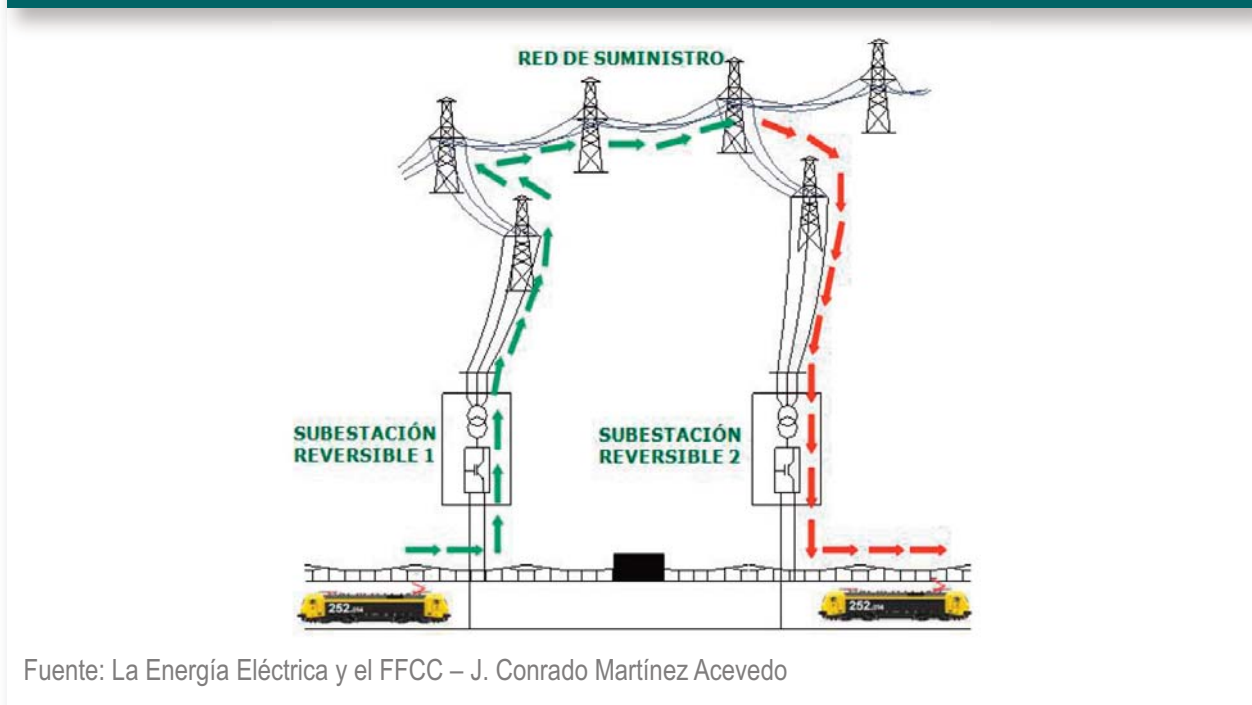
En el nuevo concepto de red eléctrica ferroviaria bajo configuración y tecnología “Smart Grid”, dan cabida los nuevos y recientes desarrollos tecnológicos entre los que destacan los siguientes:

### Subestación Eléctrica Reversible CC.

Una subestación eléctrica reversible C/C es aquella que en el ámbito de una subestación eléctrica de tracción de corriente continua, es capaz de enviar la energía regenerada en el frenado eléctrico de los trenes, a la red de distribución, previo proceso de inversión (Ver Fig. 9).

De esta manera este nuevo sistema permitirá devolver a la red toda aquella energía no utilizada por el sistema ferroviario convencional, contribuyendo a la eficiencia energética global del sistema eléctrico, pues se podrá hacer uso de esta energía para otros fines.

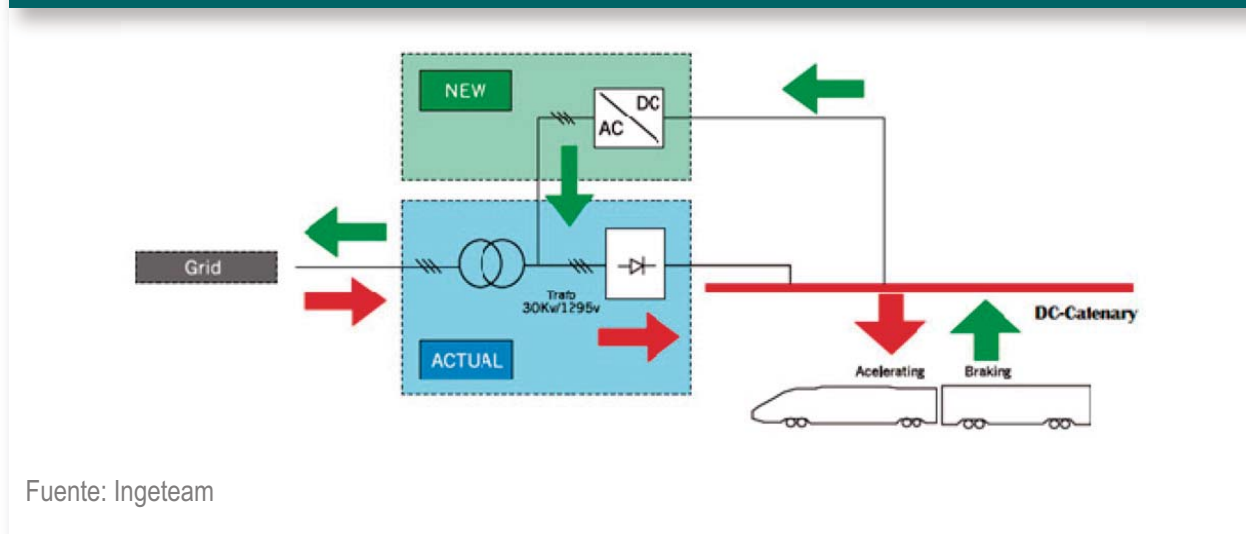
Figura 10. Inversión de Corriente en línea Convencional



En la figura 10 aparece representado en color azul el esquema eléctrico de una subestación de corriente continua no reversible, y en color verde la instalación de equipos necesaria para que la subestación pueda devolver parte de la energía regenerada a la Red de abastecimiento (SEP General).

Dentro de las nuevas tecnologías a implementar en una red eléctrica ferroviaria Smart Grid (REFI), una de ellas resulta de la combinación de las subestaciones eléctricas reversibles con los sistemas de almacenamiento. El objetivo fundamental de la instalación de un sistema de almacenamiento de energía dentro de una subestación eléctrica reversible es la nivelación de la curva de carga de la subestación. El sistema almacenaría la energía de frenado devuelta por los trenes y la devolvería cuando estos la demanden, todo ello conforme a una consigna de explotación relacionada generalmente con la tensión eléctrica de la línea aérea de contacto. La inversión en estos dispositivos de aprovechamiento de energía regenerada está fuertemente condicionado por su eficiencia en cada caso particular (dependiendo de la cantidad de energía regenerada que realmente se puede recuperar), ya que son dispositivos relativamente caros.

Figura 11. Esquema básico de Subestación de Corriente Continua con Inversor y Sistema de Acumulación



### Almacenamiento.

Los sistemas de Almacenamiento, desempeñarán un papel fundamental en la red Smart-Grid (REFI) pues bajo su filosofía se busca una optimización de los procesos energéticos. Entre la línea aérea de contacto y los módulos de almacenamiento existirá un convertidor electrónico de potencia con el objeto de acondicionar la señal entre ambos elementos así como controlar el trasvase de energía entre ambos. Su principio de funcionamiento, consiste en almacenar la energía regenerada en plantas de almacenamiento situadas en tierra, que se situarán o en la propia subestación de tracción, o repartidas a lo largo de la línea, y que suministrarán la energía almacenada cuando los trenes vuelvan a demandarla.

### Microgeneración.

Un sistema de Microgeneración de energía eléctrica, se obtiene mediante dispositivos de obtención de energías renovables (solar y eólica) junto con un dispositivo de almacenamiento, considerando que su potencia nominal no sobrepasará los 20 kW.

Los sistemas de Microgeneración, contarán con un sistema de almacenamiento de energía, donde se acumule el excedente de generación y lo dejen disponible de uso en las horas de mayor consumo o cuando no se cuente con provisión de energía solar o eólica.

Su aplicación en la REFI será de la mano de pequeños consumidores instalados a pie de vía e infraestructura que en la actualidad se alimentan directamente desde la catenaria (instalaciones de alta velocidad o de C/A) o desde el feeder de alimentaciones auxiliares (instalaciones convencionales o de C/C). Por citar algunos elementos, su aplicación quedaría para elementos o dispositivos de control de parámetros que afecten a la operación o la vía, p. ej., dispositivos de medición de viento, elementos de medición de cajas calientes, etc...

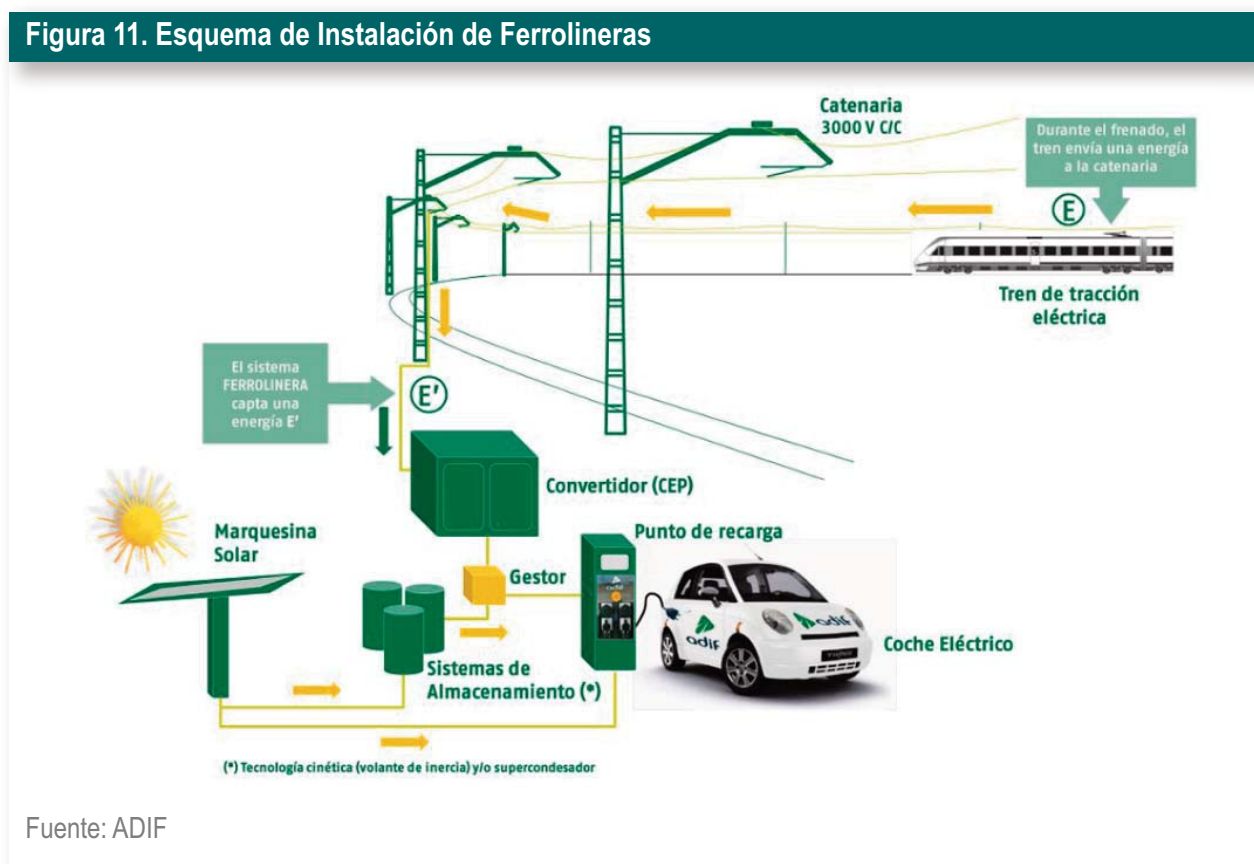
## Ferrolineras.

La implantación de esta nueva tecnología, dependerá en mayor o menor grado del avance de implantación de la tecnología Smart Grid en la red eléctrica ferroviaria.

Se trata de un innovador sistema de carga de vehículos eléctricos que consiste en aprovechar la energía eléctrica procedente de las subestaciones eléctricas que alimentan la catenaria (generada mediante la aplicación del frenado regenerativo de los trenes), almacenar dicha energía limpia en sistemas de almacenamiento de energía, y sumarla a las energías renovables (fotovoltaica o eólica) recogida en las marquesinas de los aparcamientos de estas instalaciones.

Un gestor de control establece las consignas predeterminadas que cargan al coche eléctrico, teniendo en sí una auténtica red eléctrica inteligente (Smart Grid).

Figura 11. Esquema de Instalación de Ferrolineras



El vehículo eléctrico (tecnología V2G) constituye un sistema importante dentro de las redes Smart Grid, por lo que su integración dentro del sector eléctrico ferroviario mediante su conexión a las ferrolineras situadas en la nueva red, permitirá disponer de un uso más eficiente de la energía, contribuyendo así a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte.

La red ferroviaria española cuenta con 14.000 kilómetros de extensión y más de 1.500 estaciones e instalaciones susceptibles de aprovechamiento por el sistema, lo que le permitiría convertirse en el mayor agregador de puntos de recarga y contribuir a impulsar la industria del vehículo eléctrico.

## 5. CONCLUSIONES

Las Smart Grids proporcionan una serie de ventajas directas sobre empresas y usuarios que repercutirán directamente en el desarrollo del mercado energético y en la evolución de la red eléctrica hacia una red inteligente. Al sector ferroviario, no le son indiferentes estas ventajas, y la aplicación y transformación de su red eléctrica a una red eléctrica inteligente (Smart-Grid) redundará en una mejora global para todo su sistema.

La evolución y conversión de la red eléctrica actual a una nueva REFI (Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente “Smart Grid”), se plantea de forma factible. Se crea la figura del “nodo de comunicación”, asociado a la infraestructura eléctrica ferroviaria actual donde se incorporan las nuevas tecnologías que van a permitir dotar a la red de una mayor independencia, al disponer la red de una generación distribuida, un mayor nivel de supervisión y automatización y una mayor seguridad.

Aparece la figura de la subestación eléctrica reversible C/C que toma un papel muy importante en todo el sistema, junto con la importancia de la gestión de energía proporcionada por el freno eléctrico por recuperación.

Todo ello será posible gracias a la existencia de un sistema central que permitirá una mayor gestión de la demanda energética de la red en concordancia con la gestión de la explotación ferroviaria. La implantación de este sistema, estará en consonancia y en relación directa con los sistemas eléctricos y de telecomunicaciones que se disponen actualmente en la red eléctrica ferroviaria española.

Por lo tanto, se llega a la conclusión general de que con la implementación de un sistema Smart-Grid en la red eléctrica ferroviaria, se espera contribuir a una mejora de la eficiencia energética, y al desarrollo del nuevo sistema de gestión energético ferroviario, mediante el logro de un mejor aprovechamiento de todos los recursos disponibles, pudiendo llegar así a mejorar la operación y rentabilidad de toda la red eléctrica ferroviaria.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] BOAL MARTIN-LARRAURI, Jaime. *Smart Grid. Comunicaciones Industriales Avanzadas*, 2.010.
- [2] BRUINENBERG, Jan, et al. *Smart Grid Coordination Group Technical Report Reference Architecture for the Smart Grid Version 3.0 (Draft) 2012-08-11*. CEN, CENELEC, ETSI, Tech.Rep, 2012.
- [3] CARMONA SUAREZ, Manuel; and MONTESINOS ORTUÑO, Jesus. *Sistemas De Alimentación a La Tracción Ferroviaria*. FORMARAIL, S.L., 2012. ISBN 978-84-615-9536-5.
- [4] Centros Tecnológicos de España, FEDIT. *SMART GRIDS y La Evolución De La Red Eléctrica. Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones.*, 2.011.
- [5] Collaborative project. *Sustainable and Intelligent Management of Energy for Smarter Railway Systems in Europe: An Integrated Optimisation Approach*. (MERLIN). <http://www.merlin-rail.eu/> ed., 2.012.
- [6] CONRADO MARTÍNEZ-ACEVEDO, Jose. *Análisis De Las Perturbaciones Producidas Por El Sistema Eléctrico De Potencia De Ferrocarriles De Alta Velocidad Alimentados a Frecuencia Industrial Analysis of Disturbances Produced by the Electric Power System of High Speed Railways Fed at Industrial Frequency*. *Revista Vía Libre-Técnica*, 2014, pp. 1.
- [7] CONRADO MARTÍNEZ-ACEVEDO, José. MUGISF-M4-EF-01. *Sistemas De Instalaciones Ferroviarias. Electrificación Ferroviaria. La Energía Eléctrica y El FFCC.* . CONRADO MARTINEZ-ACEVEDO, José ed., Madrid, Enero 2.014a.
- [8] CONRADO MARTÍNEZ-ACEVEDO, José. MUGISF-M4-EF-06. *Sistemas De Instalaciones Ferroviarias. Electrificación Ferroviaria. La Subestación Eléctrica De Tracción. Conceptos Principales.* . CONRADO MARTINEZ-ACEVEDO, José ed., Madrid, Enero 2.014c.
- [9] CONRADO MARTÍNEZ-ACEVEDO, José, et al. *Devolución De Energía Eléctrica Desde El Sistema Ferroviario a La Red De Suministro y Reaprovechamiento Previo.*, pp. 1.
- [10] CONRADO MARTÍNEZ-ACEVEDO, José, *Repaso general y perspectiva tecnológica futura de la infraestructura de tracción ferroviaria (I)*. *Revista Vía Libre-Técnica*, 2015.
- [11] *Diario Oficial de la Unión Europea. Directiva 2012/27/UE Del Parlamento Europeo y Del Consejo, De 25 De Octubre De 2012, Relativa a La Eficiencia Energética, Por La Que Se Modifican Las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y Por La Que Se Derogan Las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE*. BOE: 14-11-12, 2012.
- [12] DÍAZ ANDRADE, Carlos Andrés; and HERNÁNDEZ, Juan Carlos. *Smart Grid: Las TIC's y La Modernización De Las Redes De Energía Eléctrica. Estado Del Arte. Sistemas y Telemática*, 2011.
- [13] EUROPEAN COMMISSION, Energy. *European Commission - Energy - Single Market for Gas & Electricity - Smart Grids*. Available from:  
[http://ec.europa.eu/energy/gas\\_electricity/smartgrids/taskforce\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/smartgrids/taskforce_en.htm)
- [14] FOSSATI, Juan Pablo. *Revisión Bibliográfica Sobre Microredes Inteligentes. Memoria De Trabajos De Difusión Científica y Técnica*, 2011, vol. 9, pp. 13-20.



[15] GARCÍA ÁLVAREZ, Alberto; and Martín Cañizares, M<sup>a</sup> del Pilar. *ELECRAIL - Monografía 1 - Cuantificación Del Consumo De Energía Eléctrica Del Ferrocarril Español. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. ed. , 2008. ISBN 978-84-89649-85-9.*

[16] GERACI, Anne, et al. *IEEE Standard Computer Dictionary: Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries. IEEE Press, 1.991.*

[17] HAWKINS, K. *Smart Grid Problems Revealed: The NERC Study, 2.010.*

[18] MELIS MAYNAR, Manuel; and GONZÁLEZ FERNANDEZ, Francisco J. *Ferrocarriles Metropolitanos. Tranvías, Metros Ligeros, y Metros Convencionales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., 2.002. ISBN 9788438003848.*

[19] MORENO, Víctor Andrés Martín. *Diseño e Implementación De Una Red De Comunicaciones Ferroviaria De Alta Velocidad Design and Implementation of a Telecommunications Network High-Speed Rail. El Efecto De Los Trenes y Servicios De Ancho Variable En La Accesibilidad De La Red Ferroviaria De Alta Velocidad, 2012, vol. 4, pp. 49.*



# Estudio de la calidad de la energía en el sistema eléctrico y su aplicación al sistema ferroviario

## *Study of the quality power in the electrical system and its scope of applicability to the rail system*

Antonio Berrios Villalba<sup>1</sup>

### RESUMEN

La energía eléctrica es un bien de consumo y, como tal, debe ser evaluada su calidad.

El suministro de la energía eléctrica es esencial en nuestra sociedad actual. Los tres pilares en los que se basa toda la regulación del sector eléctrico son el de garantizar el suministro eléctrico, garantizar la calidad del suministro y garantizar que se realice al menor coste posible.

La falta de calidad de la energía eléctrica puede afectar negativamente a los dispositivos que están conectados a la misma.

Se ha desarrollado un importante paquete de normas técnicas, internacionalmente aceptadas, relativas a la identificación y definición de los parámetros que evalúan la calidad de la energía eléctrica y la forma de medirla para poder estandarizar las mismas y, a su vez, se ha desarrollado por la industria distintos dispositivos electrónicos inteligentes que miden esos parámetros de la onda de energía y calculan la calidad de la misma, con una precisión más que aceptable.

La administración, por su parte, en concreto en nuestro país el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, que regula el desarrollo del sector eléctrico, también ha definido los límites que han de cumplirse por los suministradores de energía eléctrica para garantizar esta calidad del suministro recibido por el consumidor.

El ferrocarril no está excluido de esta regulación y se analizan en este artículo las distintas normas vigentes en esta materia identificando los problemas intrínsecos del sector y realizando un ejercicio de tentativa en la extrapolación o aplicación de las normas actuales sobre el sistema ferroviario, con el objetivo de profundizar en el conocimiento de esta materia y disponer de sistemas que permitan evaluar el grado de cumplimiento de esta calidad, en los puntos de conexión del suministro eléctrico al sistema ferroviario y, dentro de éste, cuando se suministra energía eléctrica a trenes e instalaciones para obtener, si cabe, una cada vez más eficiente explotación ferroviaria.

### PALABRAS CLAVE

Calidad de la energía eléctrica, calidad de onda, ferrocarril, flicker, armónicos, desequilibrio de tensión, hueco de tensión, sobretensiones, interrupción, freno regenerativo.

<sup>1</sup> Ingeniero Industrial en Electrónica e Ingeniero Técnico en Electricidad, Máster en Dirección Estratégica Internacional por la UPM, Gerente de Área de Ingeniería de Activos de Energía de ADIF, Chairman Energy Management Sector en la Organización Internacional de Ferrocarriles UIC desde 2014 y Editor de la Revista Vía Libre-Técnica de la FFE ([www.tecnica-vialibre.es](http://www.tecnica-vialibre.es))

## **ABSTRACT**

Electricity is a commodity and as such its quality should be evaluated.

The supply of electricity is essential in today's society. The three pillars on which the entire electricity sector regulation is based are to guarantee the power supply, ensure the quality of supply and ensure that they perform at the lowest cost possible.

The lack of quality of electric power can adversely affect the devices connected to it.

A major package of technical standards has been developed, internationally accepted, regarding the identification and definition of parameters to assess the quality of electricity and how to measure to standardize them and, in turn, various intelligent electronic devices have been developed by industry which measure the wave energy parameters and calculates the its quality, with a more than acceptable accuracy.

The administration, mainly, particularly in our country, the Ministry of Energy, which governs the electricity sector, has also defined the limits to be met by suppliers of the electricity to ensure the quality of the supply received by the consumer.

The railway is not excluded from this regulation and the various existing rules in this area are discussed in this article identifying the intrinsic problems of the rail and conducting an exercise attempt at extrapolation of current rules on the railway system, with the aim of deepening knowledge of this matter and have systems to assess the degree of compliance of this quality in the connection points of power to the rail system and, within that, when power is supplied to trains and facilities to obtain, if possible, an increasingly efficient rail operation.

## **KEY WORDS**

Power Quality, railway, harmonics, flicker, voltage unbalanced, peak, fault analysis, waveform, frequency, disturbances, regenerative brake.

## 1. INTRODUCCION

La evaluación de la calidad de la energía eléctrica es en nuestros días una tarea que tiene como objetivo final reducir las perturbaciones que se producen en la onda de tensión, que provocan a su vez interrupciones del servicio eléctrico y daños en los equipos que están conectados a la red de distribución de la energía eléctrica.

Las perturbaciones pueden ser creadas desde las fuentes de generación de energía, pueden introducirse en el transporte de la misma o incluso generarse por los propios consumidores de la energía.

Normativas de ámbito internacional están en constante desarrollo y han permitido consolidar un paquete de estándares que incorpora la información aceptada para saber el qué hay que medir, dónde hay que medirlo, cómo hay que medirlo y cuáles son los umbrales aceptables estadísticos para evaluar la calidad de esta energía.

La explotación ferroviaria por su parte está comenzando a incorporar estos conceptos en su gestión de la energía, una vez que se identifican oportunidades de reducción de coste en el importe total de la energía consumida al verter sobre la red la energía regenerada por el frenado de los trenes.

Es necesario por tanto desarrollar estudios, como el que se realiza en este artículo, que aborden, desde una perspectiva comparativa, aspectos como el de identificación de los puntos frontera para medir la calidad de la energía en el sistema ferroviario, los distintos umbrales estadísticos de cada parámetro, las principales perturbaciones que pueden estar presentes proponiendo, a la vez, soluciones técnicas de mitigación de las mismas.

## 2. ENTORNO LEGISLATIVO EN LA CALIDAD DE SUMINISTRO

En España la regulación de la calidad del suministro eléctrico se ha ido desarrollando paulatinamente en el marco legislativo del desarrollo del sector eléctrico.

En el año 1997, la ley 54/1997 del sector eléctrico, incorporaba en su artículo 48 la responsabilidad de la Administración General del Estado en establecer índices objetivos de calidad del servicio y que las empresas eléctricas estarán obligadas a facilitar a la Administración la información de sus índices de calidad.

En el BOE nº197, del 18/08/1998 se publicó la resolución que aprueba una serie de procedimientos técnicos necesarios para realizar la adecuación gestión técnica del sistema eléctrico y entre ellos el Procedimiento de Operación del sistema P.O.-1.4 Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema, en el que se indican los límites de la calidad del servicio en el punto frontera entre el agente conectado al punto y el operador del sistema.

En el año 2000, el Real Decreto RD 1995/2000 en su Capítulo II, del Título VI, establecía el contenido y extensión de la calidad del suministro eléctrico. Este capítulo identifica los indicadores relativos a la interrupción del suministro, a la calidad de la onda de tensión suministrada y, por último, a la calidad de atención al cliente. Establece los límites estadísticos de cada parámetro y comunica las responsabilidades de cada parte y las penalizaciones económicas de no cumplirse los límites establecidos.

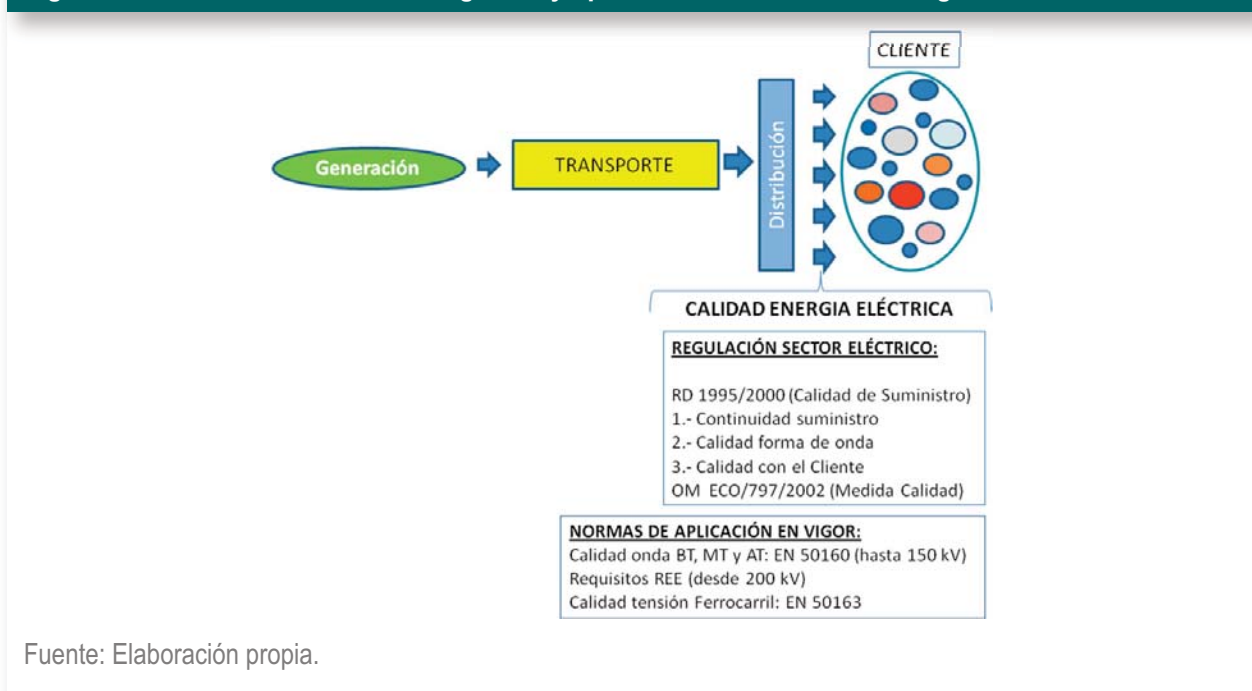
En el año 2002, la Orden Ministerial OM ECO/797/2002, establece con todo detalle el procedimiento para medir la calidad del suministro de energía de una forma homogénea para todas las empresas y que esta medida pueda ser auditable.

También se ha tenido en cuenta en la citada Orden Ministerial el hecho de que la calidad del suministro se puede ver afectada por los distintos consumidores, que pueden provocar perturbaciones que afectan a la calidad de la onda de intensidad, y para mitigarlo reduciendo estos efectos, se definen mecanismos de coordinación entre el suministrador de la energía y el consumidor. Se establece, igualmente, la posibilidad de que cliente y distribuidor puedan establecer otros límites de calidad de suministro más exigentes que los ya establecidos en el Real Decreto anteriormente citado.

Por último, Red Eléctrica de España (REE), como operador de la red de transporte, ha editado en su documento de Referencia TI.E/02/040, las condiciones de intercambio de energía para puntos de conexión, en el que define el conjunto de características que debe cumplir la calidad de onda de tensión.

Para ayudar a tener una visión gráfica de los distintos actores que intervienen y el marco legal establecido, se incluye a continuación en este artículo un gráfico que se ha realizado para representar, de forma muy simplificada, cómo la energía una vez generada y transportada es distribuida y comercializada al consumidor final, siendo este último eslabón donde se aplica la regulación de la calidad del suministro definida en el RD 1995/2000, con los procedimientos de medida identificados en la OM ECO/797/2002, todo ello con el soporte técnico de la norma europea EN 50160:2010 de calidad de la energía suministrada por las redes de distribución en Baja, Media y Alta tensión y con el de la norma EN 50163 para la tensión en catenaria:

**Figura 1. Actores en el Sector Energético y aplicación Calidad de la Energía**



### 3. ENTORNO NORMATIVO EN ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO

La norma técnica que establece los parámetros de calidad de suministro en redes de distribución eléctrica en Europa, hasta los 150 kV, es la EN 50160 y en Norteamérica la IEEE 1159.

Esta norma europea identifica los límites o los valores de las características de tensión que todo cliente tiene derecho a esperar en relación a los valores de frecuencia, amplitud, forma de onda y simetrías de las tensiones trifásicas.

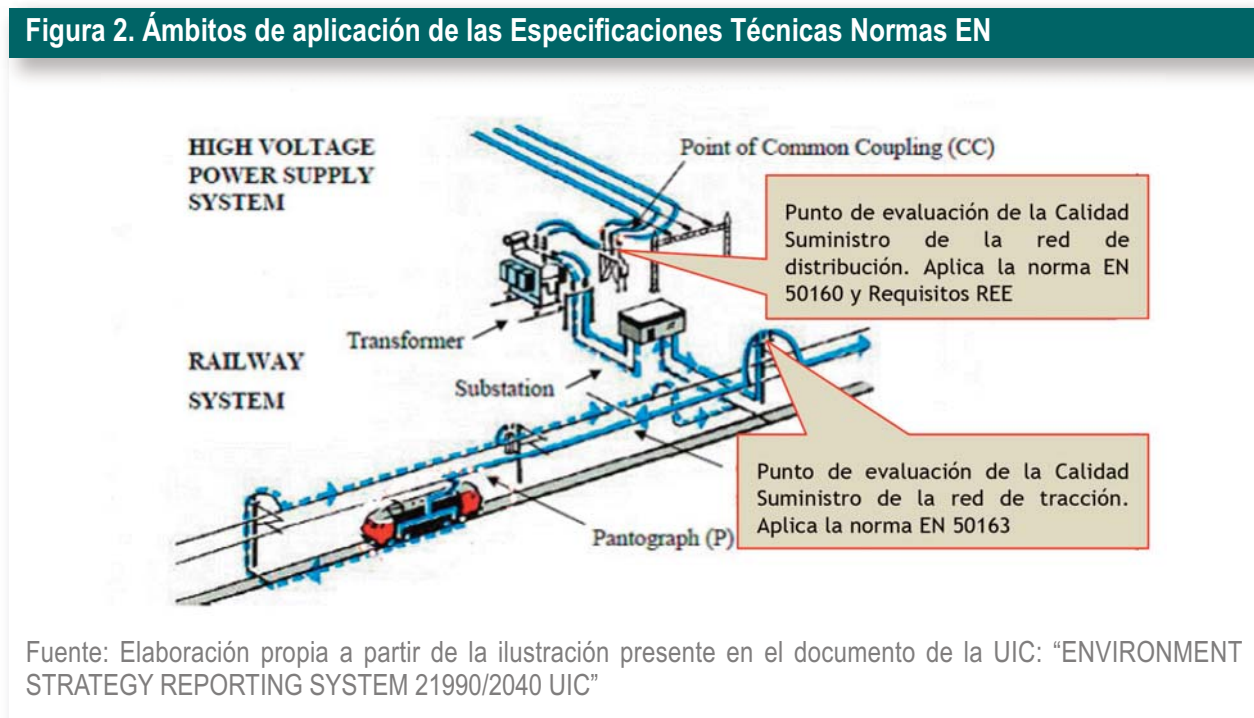
Los métodos de medida para realizar de forma homogénea y auditable los distintos parámetros de la calidad de suministro y su interpretación, están definidos en las normas IEC 61000, que analizan:

- La frecuencia
- La amplitud de la tensión de alimentación
- Las tensiones transitorias
- El desequilibrio de tensión
- Los armónicos e interarmónicos de tensión
- Las señales de transmisión por la red
- Las variaciones rápidas de tensión

Por otra parte, para el suministro en el ámbito ferroviario, se ha desarrollado la Norma Europea EN 50163, que establece las principales características que han de cumplir las tensiones de alimentación de las redes de tracción estableciendo los límites permisibles, respecto a los valores nominales, de la tensión y su frecuencia, en valor y duración.

Por último, tal y como se ha indicado anteriormente, REE mantiene publicada las condiciones que tienen que cumplir las instalaciones que conectadas a la red peninsular (Documento de Referencia TI.E/02/040, Mayo 2010) estableciendo los límites más significativos de la onda de tensión para los puntos frontera entre la red de transporte y los agentes conectados a la misma para tensiones iguales o superiores a 200 kV.

En la siguiente figura, representativa del flujo de la energía desde la generación hasta el uso por el tren, se identifican los puntos frontera de los suministros, tanto el de la red de distribución pública con la subestación, donde aplica la norma EN 50160, como el punto de salida desde la Subestación de tracción a la catenaria para la alimentación de los trenes con tracción eléctrica e instalaciones ferroviarias que están conectadas a esta red de suministro de tracción, que aplica la norma 50163:



De todo el marco de estandarización desarrollado hasta el momento quedan aún por normalizar rangos de tensión que no se encuentran en ninguna norma. En concreto entre los 150 kV, que es el límite superior de la EN 50160, y los 200 kV, que es la tensión desde la que parte REE para definir los límites de la calidad de la onda de las instalaciones conectadas a la red.

Y en cuanto a las redes de tracción eléctrica ferroviaria, la EN 50163, también requiere un desarrollo de su alcance en la definición de la calidad del suministro teniendo en cuenta a sus valores estadísticos para los parámetros de interrupción, armónicos, hueco de tensión, etc... ya que sólo define umbrales pero no valores estadísticos que son los que se requieren para valorar la calidad del suministro.

## 4. SIGNIFICADO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Según el RD 1995/2000, se entiende como Calidad de Servicio “el conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes de la Administración”

Respecto a esta Calidad de Servicio se definen los aspectos que se deben cumplir:

**La continuidad del suministro**, relativa al número y a la duración de las interrupciones. Estableciendo los límites para el tiempo máximo de interrupción del servicio (TIEPI) y número máximo de interrupciones (NIEPI) para incidencias de interrupción superiores a los 3 minutos. El Real Decreto establece los límites anuales de estas interrupciones por zonas urbanas y rurales, estableciendo las compensaciones económicas a las que tiene derecho el consumidor en el caso de no cumplir con estos umbrales de calidad del suministro.

**La calidad de la forma de onda de tensión**, principalmente, las variaciones del valor eficaz de la tensión y de la frecuencia y por las interrupciones de servicio y huecos de tensión de duración inferior a tres minutos. Para la determinación de los umbrales de calidad se establece por el RD que son los incluidos en la norma EN 50160.

**La calidad de atención y relación con el cliente**, en lo que se refiere al asesoramiento en materia de contratación, facturación, cobro, medida de consumos y demás aspectos derivados del contrato suscrito.

La OM ECO/797/2002 establece los tiempos máximos de interrupción y la norma con la cual se va a medir esta calidad que es la EN 50160. También cita que la causa de las perturbaciones puede ser del proveedor de energía, del consumidor o de terceros.

Las consecuencias de la falta de calidad del suministro pueden ser entre otras:

- Pérdidas de económicas como consecuencia del sobrecalentamiento de los equipos conectados a la red (motores, transformadores etc.) que provocan una drástica reducción de su vida útil, así como su rendimiento.
- Interrupciones del servicio prestado por fallos de suministro de energía inesperados.
- Errores y funcionamiento anómalo de los equipos conectados a la red.
- Daños en equipos electrónicos.
- Interferencias en redes de comunicación.
- Aumento de las pérdidas globales en el sistema.



- Necesidad de sobredimensionar las instalaciones para compensar los aumentos de tensión, dando lugar a un aumento de los gastos de funcionamiento además del impacto ecológico que conlleva este exceso.
- Inestabilidad en la sensación visual inducida por la fluctuación en el tiempo debida al fenómeno conocido como flicker.
- Fallos en la medición de los contadores de energía.

## 5. PUNTOS FRONTERA DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO EN EL SISTEMA FERROVIARIO

El sistema ferroviario no está excluido en la aplicación del RD 1995/2000 y de la OM ECO/797/2002, por tanto, es conveniente analizar cuál es el papel actual del administrador de la infraestructura ferroviaria y del operador de transporte ferroviario.

En nuestro país, ADIF y ADIF Alta Velocidad, como administradores de la infraestructura ferroviaria, tienen entre sus funciones principales la de planificar, invertir, construir y mantener una red eléctrica que le permita suministrar la energía de tracción eléctrica necesaria a los operadores de trenes, como RENFE y otros operadores privados, que circulan por la red ferroviaria, así como a los sistemas e instalaciones ferroviarias dentro de la infraestructura.

Tal y como indica en su trabajo (Francisco Manrique, 2014), ADIF Alta Velocidad, tiene encomendada la gestión de la energía, y adquiere de forma regular, por concurso público abierto, la energía de tracción a las comercializadoras de energía y abona los costes de “acceso de terceros a la red” a las empresas distribuidoras del punto de suministro, siendo éste un coste regulado. Se disponen de los convenios necesarios para que este coste de energía se repercuta entre los operadores ferroviarios con criterios de equilibrio económico, según el uso de cada operador.

Por tanto, a los efectos, ADIF Alta Velocidad, acude al mercado para adquirir la energía en su rol de “Consumidor” y por tanto le corresponden sus derechos de calidad de suministro, explícitos en el Real Decreto y Orden Ministerial vigentes al afecto.

De todo ello se interpreta que el “punto frontera de suministro” sería el punto de conexión de las subestaciones de tracción con la red de transporte, los puntos de acometida eléctrica desde la red de distribución con las Estaciones Ferroviarias, etc... Por tanto, sería en este punto frontera donde sería de aplicación los derechos y obligaciones explícitas en el RD 1995/2000 y OM ECO/797/202 y la norma técnica EN 50160 para aplicar la metodología de la medida.

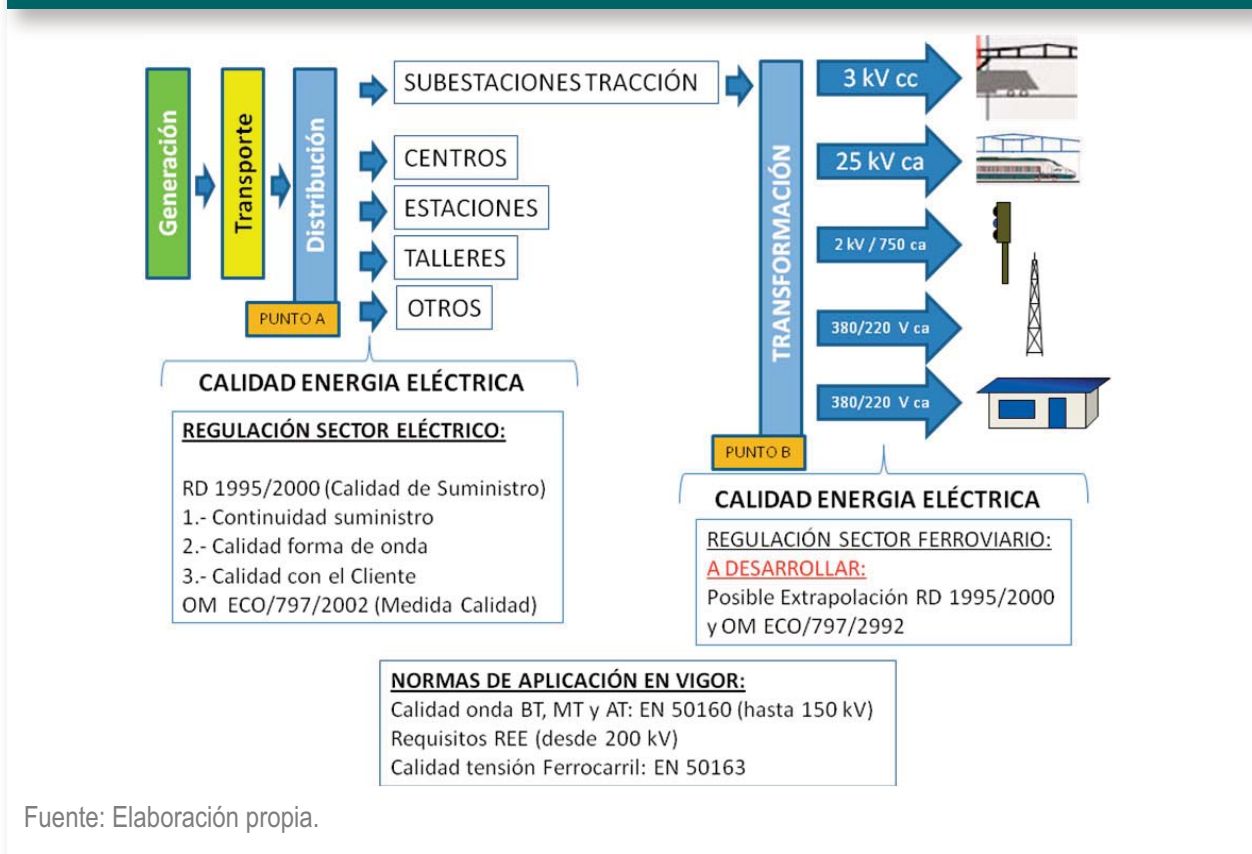
Para una mejor comprensión se ha realizado en este artículo un esquema que se acompaña a continuación identificado como “PUNTO A” el punto frontera indicado anteriormente.

Por otra parte, dentro de la propia infraestructura ferroviaria contamos con consumidores que pertenecen a distintas empresas y deberíamos analizar también estas fronteras. También ayudándonos del trabajo citado anteriormente (Francisco Manrique, 2014) que analiza con detalle cómo el Administrador Ferroviario puede ser considerado como un distribuidor entre los puntos de conexión eléctrica y los consumidores finales, que serían en este caso los Operadores de Trenes, podríamos asimilar a ADIF con el papel que ya reconocen las Directivas Europeas como propietario de “redes de distribución cerradas”.

En este caso, si aceptamos esta extrapolación, el punto frontera donde aplicar la regulación de la calidad de suministro de energía sería la conexión de la Subestación de Tracción con la catenaria, la

acometida de energía con las instalaciones de señalización y telecomunicaciones, los centros de transformación en los talleres y estaciones, etc.... Para este caso, dentro de la infraestructura ferroviaria, la norma técnica para la medida de la calidad de suministro sería la EN 50163 para el suministro de tracción en catenaria y la EN 50160 para el resto. En este caso se ha identificado como "PUNTO B" en la figura siguiente (al que se añade el "Punto A" citado anteriormente):

**Figura 3. Distribución de la Energía dentro de la Operación Ferroviaria**



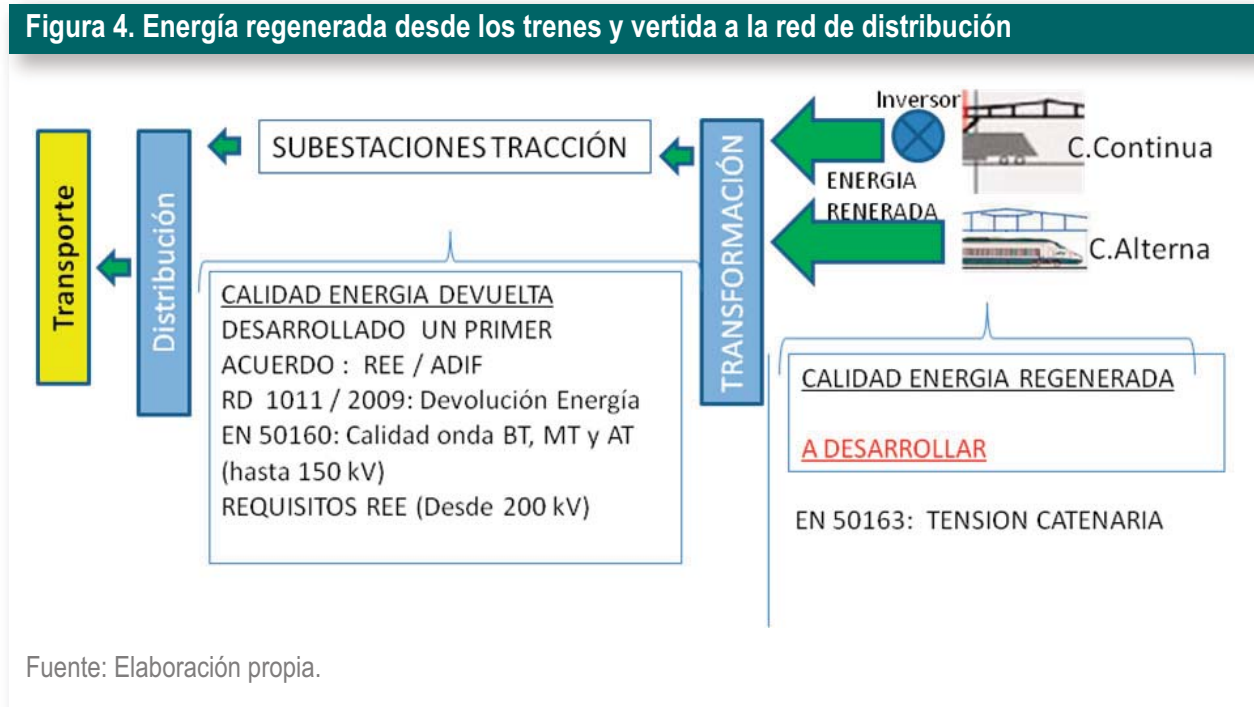
Fuente: Elaboración propia.

Por último, nos encontramos con el escenario de contemplar los vertidos de energía que se producen desde la red ferroviaria hacia la red de transporte, como consecuencia de la energía generada cuando los trenes dotados de freno regenerativo hacen uso del mismo.

Este derecho de vertido se encuentra regulado en el RD 1011/2009, en el que se permite a los consumidores, que implanten sistemas de ahorro y eficiencia energética, puedan verter a la red aquella energía que no pueda ser consumida en su propia instalación, detrayéndola de su consumo, añadiendo una disposición adicional al RD 1995/2000 relativa a los "Vertidos a la red de energía eléctrica para consumidores que implanten sistemas de ahorro y eficiencia".

Tal y como se regula, para la energía vertida en la red, se tendrá que disponer un medidor de calidad de onda en el punto frontera y establecer el acuerdo correspondiente con el gestor de distribución de ese punto para realizar el "neteo" correspondiente de la energía devuelta (diferencia entre la energía consumida y la energía devuelta).

Es por ello que queda a desarrollar por tanto un interesante marco regulatorio de la calidad de la energía en el sistema ferroviario en el que habría que incluir, sin duda, la calidad de la energía que se vierte al sistema proveniente del frenado regenerativo. Todo ello se describe en la figura siguiente:



## 6. PERTURBACIONES DESDE EL SISTEMA FERROVIARIO QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

El sistema ferroviario puede afectar la calidad del sistema de energía externo porque produce perturbaciones que pueden afectar a la red, las cargas no lineales presentes en la explotación ferroviaria (los trenes traccionando) y las fallas dentro del propio sistema de energía ferroviario son las principales causantes de estas perturbaciones.

La devolución de la energía de frenado, desde el sistema ferroviario hacia la red de suministro, supone un importante ahorro económico para el sistema ferroviario ya que le corresponde, de forma efectiva, el “neteo” (la reducción de energía a pagar al suministrador de energía). Pero el suministrador que recibe la energía de frenado, nos puede solicitar que le garanticemos una calidad de la energía vertida a la red.

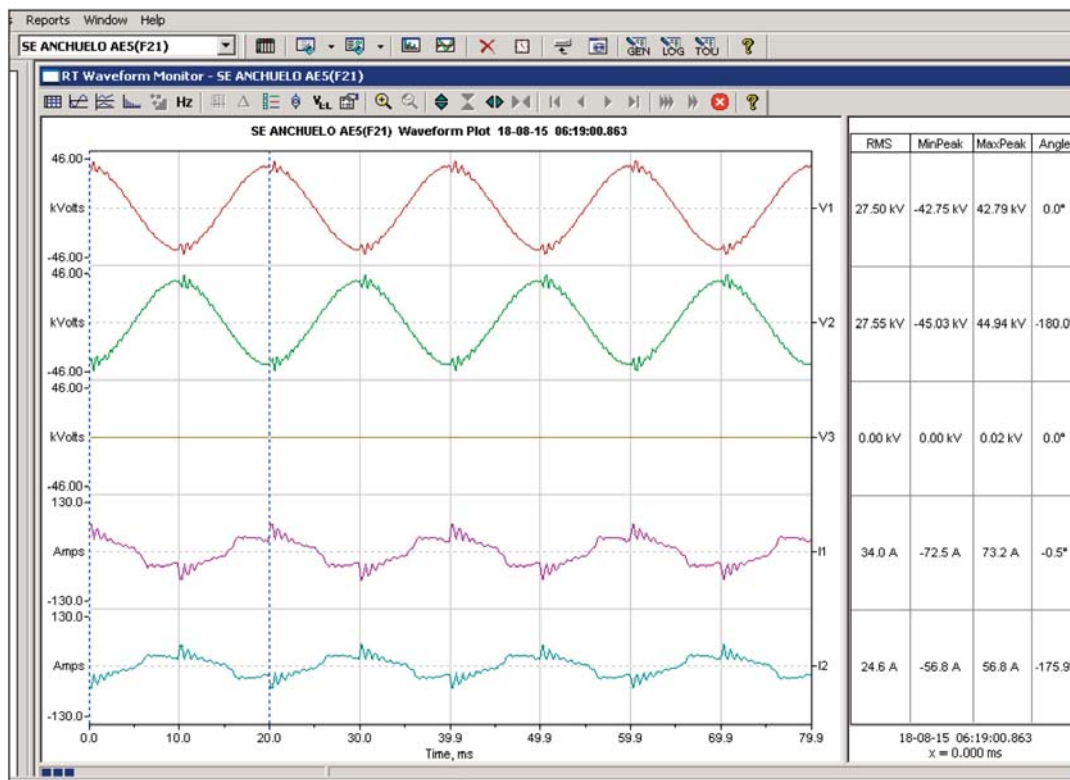
Como ejemplo de estas perturbaciones, se incluyen a continuación la forma de onda de la tensión e intensidad en catenaria medida en una campaña realizada por el Área de Ingeniería de Activos de Energía de ADIF el pasado verano del año 2015 en la subestación de Anchuelo (Guadalajara), con equipos de medida de calidad de onda, con los correspondientes transductores de medida en los transformadores de medida de intensidad y tensión de la catenaria y feeder, situados dentro de la subestación y antes de la salida al pórtico de seccionadores de alimentación a catenaria y feeder.

El primer tren que se muestra a continuación es de la serie 100, que dispone de una potencia de 8.800 kW y que tiene 8 motores trifásicos síncronos auto-pilotados, se puede ver cuando está traccionando una onda de tensión e intensidad distorsionada:

**Figura 5. Medida de la calidad de onda de tensión en intensidad en catenaria circulando un tren serie 100**



TREN SERIE 100 RENFE



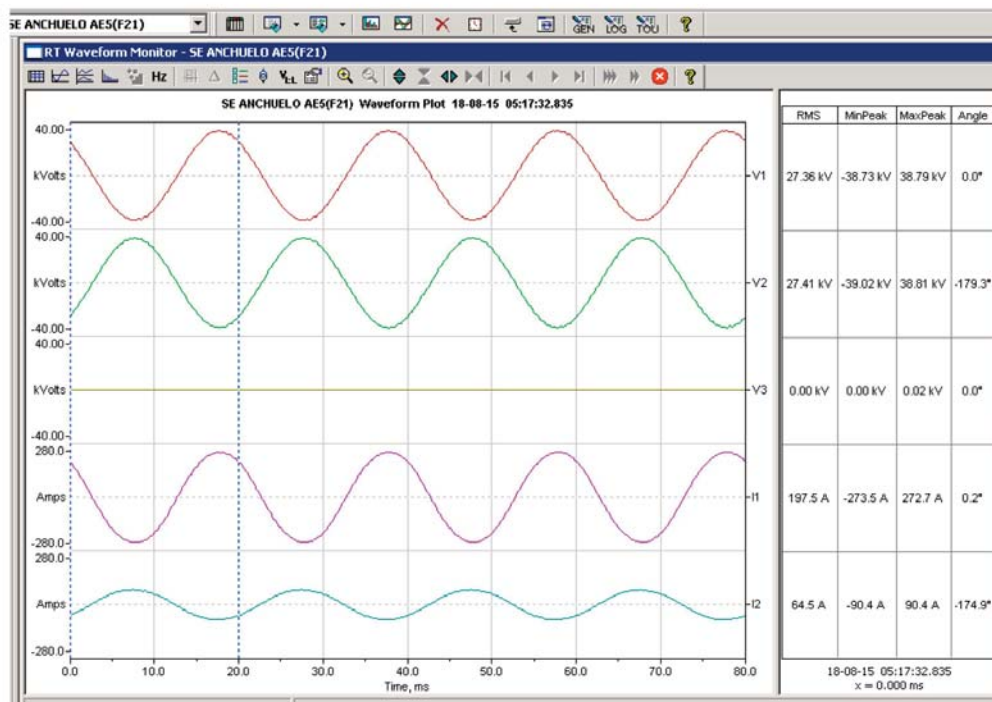
Fuente: Elaboración Propia con los datos mostrados por el software PAS Versión 1.4-SATEC del equipo de calidad de energía instalado en la SE Anchuelo, línea LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa. Por orden descendente las ondas corresponden a : tensión en catenaria, tensión en feeder, intensidad en catenaria, intensidad en feeder.

Y, como segundo ejemplo de calidad de onda, se muestra a continuación las formas de onda medidas en la circulación de un tren de la serie 103, también con 8.800 kW de potencia y en este caso dotado de 16 motores de tracción asíncronos. Se puede comprobar una calidad de onda de tensión e intensidad sin perturbaciones apreciables:

**Figura 5. Medida de la calidad de onda de tensión en intensidad en catenaria circulando un tren serie 100**



**TREN SERIE 103 RENFE**



Fuente: Elaboración Propia con los datos mostrados por el software PAS Versión 1.4-SATEC del equipo de calidad de energía instalado en la SE Anchuelo, línea LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa. Por orden descendente las ondas corresponden a : tensión en catenaria, tensión en feeder, intensidad en catenaria, intensidad en feeder.

Por tanto, será necesario supervisar la calidad de la energía vertida a la red, con analizadores de la calidad de energía instalados en los puntos frontera con la red de suministro, supervisando al menos los parámetros que se ven afectados por cargas no lineales como: la presencia de armónicos, el desequilibrio de la red y el efecto de Flickers (parpadeo). Todos estos parámetros se analizarán con más detalle en el apartado de la calidad de onda.

## 7. CALIDAD EN LA CONTINUIDAD DEL SUMINISTRO

Como se indicaba en el anterior apartado de “Significado de la calidad de energía” uno de los tres aspectos que se debe determinar en su exigencia es la “Continuidad del suministro eléctrico”.

Los umbrales vigentes en el Real Decreto 1995/2000, relativos a la calidad de la continuidad del suministro, se sintetizan en la siguiente tabla, en la cual se indican los límites anuales de la suma de las horas de interrupción de suministro y el número de sucesos de interrupción para Baja y Media Tensión, para interrupciones mayores a 3 minutos de duración.

El RD, aunque no lo hace para otros parámetros, sí establece, en este caso, que para tensiones de suministro mayores que 36 kV habrá que considerar los límites establecidos para zona urbana, aunque el punto esté en cualquier otra zona geográfica.

**Tabla 1. Límites anuales de la calidad en la continuidad de suministro según las zonas de suministro. Fuente: RD 1995/2000**

	Baja tensión (Menor o igual a 1 KV)		Media Tensión (de 1 a 36 KV)		Alta Tensión hasta 400 kV	
	Nº horas	Nº de Interrupciones	Nº horas	Nº de Interrupciones	Nº horas	Nº de Interrupciones
<b>Zona Urbanas</b>	6	12	4	8	4	8
<b>Zona Semiurbanas</b>	10	15	8	12		
<b>Zonas Rural Concentrada</b>	15	18	12	15		
<b>Zonas Rural Dispersa</b>	20	24	16	20		

Los límites establecidos, como es lógico, son más exigentes conforme afecte a puntos de suministro de energía eléctrica situados en zonas más importantes, en cuanto al número de consumidores. Es decir, es mucho más exigente en zonas urbanas que en zonas rurales y también es más exigente conforme aumenta la tensión de suministro, ya que una interrupción del suministro puede afectar a más población conforme el punto de tensión es mayor, afectando a toda la zona de distribución de este punto de suministro.

Para una mayor información al respecto, se incluye a continuación la información del número de puntos de suministros y la potencia agregada de consumo que la red española ha tenido en el año 2015, desglosado por las cuatro zonas en las que se clasifica, según el compromiso de calidad de la continuidad del suministro (información disponible en la sede electrónica, SEDE, del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda digital):

**Tabla 2. Puntos de suministro en España en el año 2015 según la división de zonas para la calidad de continuidad del suministro**

Tipo de Zona	Potencia Instalada (MVA)	%	Nº Suministros	%
Zona urbana: conjunto de municipios de una provincia con más de 20.000 suministros, incluyendo capitales de provincia, aunque no lleguen a la cifra anterior.	71.744	46,4%	15.030.706	52,0%
Zona semi-urbana: conjunto de municipios de una provincia con un número de suministros comprendido entre 2.000 y 20.000, excluyendo capitales de provincia.	54.134	35,0%	9.468.080	32,7%
Zona rural concentrada: conjunto de municipios de una provincia con un número de suministros comprendido entre 200 y 2.000.	16.625	10,8%	3.221.602	11,1%
Zona rural dispersa: conjunto de municipios de una provincia con menos de 200 suministros, así como los suministros ubicados fuera de los núcleos de población que no sean polígonos industriales o residenciales.	11.974	7,8%	1.203.771	4,2%
<b>Total</b>	<b>154.476</b>	<b>100 %</b>	<b>28.924.159</b>	<b>100 %</b>

Fuente: Ministerio de energía, turismo y agenda digital. Calidad del suministro eléctrico.

## 8. PROPUESTA DE LOS CRITERIOS PARA ESTABLECER LA CALIDAD DEL SERVICIO DE SUMINISTRO ELÉCTRICO EN LA RED FERROVIARIA

La información incluida en el apartado anterior se puede utilizar para hacer una propuesta de extrapolación de la calidad de la continuidad del suministro de forma específica en la red ferroviaria.

En la tabla anterior los puntos de suministro son de todo tipo; hogares, hoteles, industria, etc... clasificados por zonas según la densidad de población.

Para el caso de la red ferroviaria estos puntos de suministro serían, por simplificar, las acometidas en las subestaciones de tracción eléctrica que alimenta a los trenes eléctricos y a las instalaciones asociadas a las líneas electrificadas.

En una primera opción, para este intento de extrapolación con la red ferroviaria, se podría interpretar que el punto de suministro (subestación eléctrica) dependiendo de la localidad donde se encuentre y

del nivel de tensión de la acometida, los límites de la calidad de la continuidad de suministro se puede obtener directamente de la Tabla 1 de los límites establecidos por el RD 1995/2000, como interpretación literal del Real Decreto.

Sin embargo, con esta interpretación nos podemos encontrar una subestación en un núcleo de cercanías, donde se transportan cientos de miles de viajeros diariamente, se pueda considerar con una calidad de suministro similar a una Zona Rural Dispersa que corresponde a la calidad del suministro a municipios de menos de 200 habitantes. Por ejemplo en la red RFIG, sería el caso de la subestación de tracción de El Tejar, que se encuentra en una zona considerada Rural pero alimenta el nudo de El Pinar de las Rozas en Madrid, que da servicio a las líneas de cercanías: C8-Cercedilla-Atocha-Guadalajara, C3-El Escorial-Aranjuez y C10-Villalba-Príncipe Pío-Fuente de la Mora, con un número de viajeros aproximado que utilizan estas líneas de cercanías al día de más de 200.000. Es por ello que se considera conveniente abordar una calidad de continuidad de suministro según el tipo de línea y/o servicio ferroviario prestado.

La Ley 38/2015 del sector ferroviario clasifica la RFIG en subredes en base a características técnicas, necesidades de mantenimiento y tipo de servicio soportado y su intensidad. Los tipos de línea o subred son:

**A:** Uso principal de tráfico de Alta Velocidad.

**B1:** Viajeros inter-ciudades de Velocidad entre 160 Km/h y 220km/h, fuera de cercanías y líneas tipo A.

**B2:** Resto Viajeros inter-ciudades.

**C1:** Núcleos de cercanías con densidad de circulación  $\geq 80$  circulaciones/día

**C2:** Núcleos de cercanías con densidad de circulación  $< 80$  circulaciones/día

**D:** Uso principal mercancías.

**E:** Resto.

Por tanto 7 tipo de subredes según su uso que podríamos correlacionar con los 4 tipos de zonas identificadas en el Real Decreto 1995/2000.

A continuación se incluye, según los datos publicados por ADIF en el CIRTRA 2015, el número de kilómetros de cada tipo de líneas, que a su vez para este análisis hemos separado en electrificadas y no electrificadas:

**Tabla 3. Longitud kilométrica de las distintas subredes en la RFIG. Líneas electrificadas y no electrificadas. Fuente: CIRTRA 2015.ADIF**

		Viajeros			Cercanías		Mercancías	Resto	
		$V \geq 220$	$220 > V \geq 160$	$160 > V$	$\geq 80$ circ/día	$< 80$ circ/día			
		<b>A</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	
KM DE LÍNEAS ELECTRIFICADAS	Única	3.937,9	45,4	291,9	1.532,2	250,9	479,9	1.050,5	287,0
	Única/Doble	190,6	80,4	-	61,4	-	48,8	-	-
	Doble	5.589,1	2.254,1	317,6	1.363,7	837,1	478,6	336,1	2,0
		9.717,7	2.379,9	609,5	2.957,4	1.088,0	1.007,3	1.386,6	289,0
KM DE LÍNEAS NO ELECTRIFICADAS	Única	5.644,0	-	236,3	1.480,3	-	613,3	431,8	2.882,4
	Única/Doble	5,9	-	-	5,9	-	-	-	-
	Doble	17,6	-	-	-	-	15,9	1,7	-
		5.667,5	-	236,3	1.486,2	-	629,1	433,5	2.882,4

Si hacemos la equiparación de las distintas tipologías de zonas de suministro con las distintas subredes, asimilando las mismas según la densidad de población a la que sirven el transporte podría ser una opción razonable esta propuesta:



**Tabla 4. Propuesta tentativa de extrapolación de la clasificación de zonas con calidad de continuidad de suministro respecto a las que podría tener el sistema ferroviario según el tipo de subredes RFIG0**

Correspondencia con RD	% Puntos suministro España 2015	Redes RFIG	Tipo	Km suma subredes	% km suministro RFIG
<b>Zona Urbanas</b>	<b>52,0%</b>	Líneas de Alta Velocidad y Líneas con Tráfico de Cercanías	A + C1 + C2	4.475	46 %
<b>Zona Semiurbanas</b>	<b>32,7%</b>	Líneas de Largo Recorrido	B1 + B2	3566	37 %
<b>Zonas Rural Concentrada</b>	<b>11,1%</b>	Líneas de Mercancías	D	1.387	14 %
<b>Zonas Rural Dispersa</b>	<b>4,2%</b>	Otras Líneas	E	289	3 %

Se ha incluido en esta tabla en la primera columna, la clasificación dada en el RD 1995/2000 para los distintos umbrales de continuidad de suministro según la densidad de población. En la segunda columna, el porcentaje que ha supuesto de puntos de suministro en el año 2015 en nuestro país y en las siguientes columnas, la posible agrupación de subredes según los núcleos de población que atienden y según el tipo de servicio, sumando las distintas subredes y comprobando el porcentaje de kilómetros de red ferroviaria que tendría cada clasificación. Se puede comprobar que los conceptos son equiparables y que incluso los porcentajes, una vez obtenidos, son muy aproximados entre el número de puntos de suministro dotados de una calidad de suministro y los kilómetros de red con la correspondiente similitud en el compromiso de continuidad de suministro.

Por supuesto que este primer estudio requerirá análisis posteriores a fin de obtener decisiones colegiadas que permitan adaptar el marco legal y normativo a la especificidad del transporte ferroviario que no en vano consumo más del 1,5 % de la energía eléctrica en nuestro país y como tal debe ser regulada la calidad de energía en base al servicio que hay que ofertar al transporte de viajeros y mercancías en líneas electrificadas.

## 9. PARÁMETROS DE LA CALIDAD DE LA ONDA DE TENSIÓN

El segundo de los aspectos que tiene en cuenta el Real Decreto de Calidad de la energía es la “calidad de la forma de onda de tensión”.

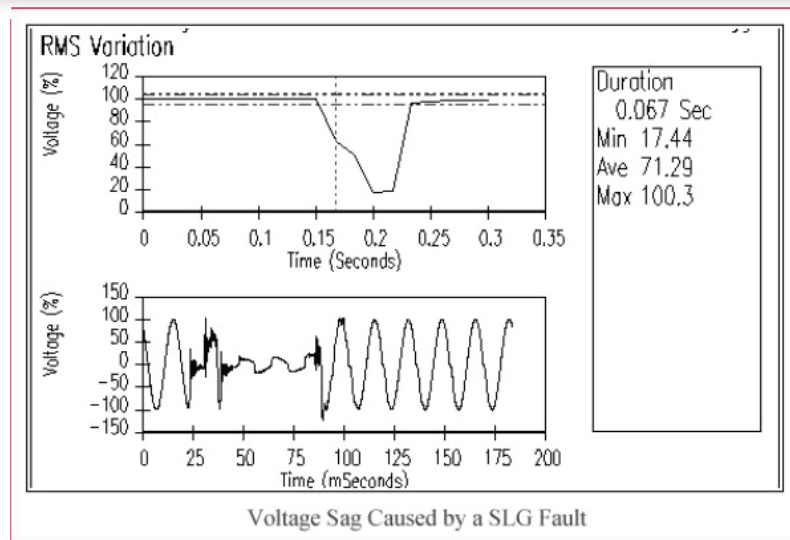
Los valores que caracterizan la tensión eficaz de alimentación suministrada son, entre otros, los siguientes: la frecuencia, la amplitud, la forma de onda y la simetría de las tensiones trifásicas. No obstante, vamos a analizar en este artículo todos los parámetros más importantes que se caracterizan en las normas actualmente vigentes de calidad de energía.

## a) Huecos de Tensión

Un Huevo de Tensión es una reducción brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y hasta el 10% del valor nominal seguido de una reposición de la tensión después de un corto lapso de tiempo (por convenio entre los 10 milisegundos y 60 segundos).

La profundidad del huevo se define como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el huevo de tensión y la nominal. En el ejemplo que se ilustra a continuación (Juan Carlos Campo Avella, 2007) se puede observar un huevo de tensión de profundidad 83 y de duración de 67 ms.

Figura 7.Huevo de Tensión



Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159

Los huecos son clasificados según la magnitud de la tensión residual y su duración.

Los huecos más comunes son los que duran menos de 1 segundo y tienen una reducción de la tensión residual cercana al 60 %.

Estos huecos son causados normalmente, en general, por defectos que sobrevienen de las instalaciones de los consumidores, por ejemplo, conmutaciones de carga, y también por descargas atmosféricas, cortocircuitos, contacto de animales o árboles, accidentes, arranque de grandes motores de inducción, etc.-

Los problemas que causan están relacionados con disparos en controles sensibles, aperturas de relés en subestaciones, etc... que suponen interrupciones del tráfico ferroviario que a la postre suponen pérdidas de tipo económico.

La mitigación de estos huecos se puede conseguir estabilizando la señal de tensión con acondicionadores de red, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc...

## b) Interrupciones de la Tensión

Se considera este defecto cuando la tensión en los puntos de suministro se sitúa por debajo del 1 % del valor de la tensión nominal. Puede considerarse "prevista" si ha sido informada a los consumidores y

responde a un trabajo programado en la red de distribución o “accidental” cuando está provocada por una avería o un suceso exterior fugitivo. Dentro de las accidentales se pueden considerar las “interrupciones breves”, menores de 3 minutos, y las “interrupciones largas” mayores de 3 minutos.

Los límites aceptables de estas interrupciones están regulados como se ha indicado anteriormente por el RD 1995 / 2000 y por la OM ECO/797/2003 y se han analizado en el apartado 7 de este documento, “Calidad en la continuidad del suministro”, y el no cumplimiento de los límites admisibles supone el derecho del consumidor a recibir una compensación económica ya regulada.

En la infraestructura ferroviaria la solución para que este tipo de interrupciones de suministro no afecte al servicio (normalmente a la desconexión de los sistemas de señalización y telecomunicaciones) es la incorporación de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI) con bancos de batería de capacidad suficiente (según tiempo e intensidad) para alimentar el tiempo necesario medio para la reposición de la tensión, pudiéndose incluso disponer de Grupos diésel electrógenos para situaciones más largas en duración. Por supuesto que estos sistemas sólo cubren las necesidades de los sistemas críticos de señalización y telecomunicaciones sin tener en cuenta nunca la tracción ferroviaria.

Este equipamiento complementario tiene normalmente un coste alto, con un ciclo de vida bajo, que encarece notablemente la instalación, por tanto, es recomendable antes de equipar con un SAI analizar con detalle la probabilidad de la falta de calidad de energía en el punto de suministro y la severidad de las consecuencias para la explotación del servicio comercial.

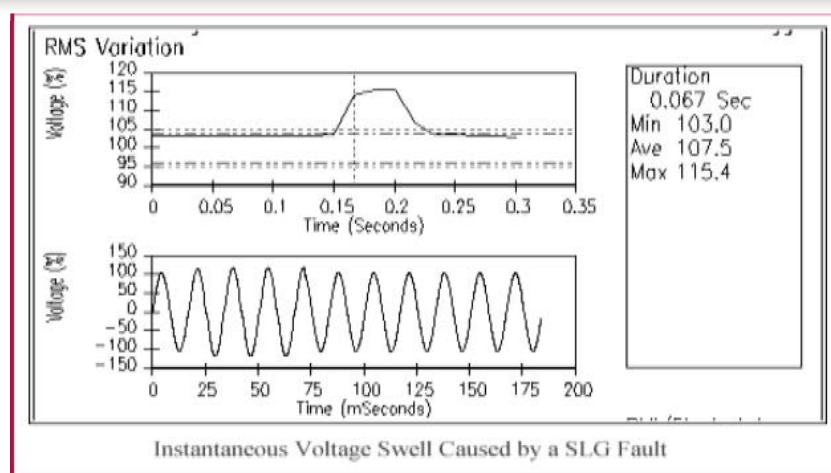
### c) Sobretensiones

Las Sobretensiones son incrementos repentinos del valor eficaz de la tensión en más del 110 % de la tensión nominal.

Las sobretensiones son “temporales” cuando pueden durar entre 10 milisegundos y un minuto y son “transitorias” cuando duran como máximo menos de 10 milisegundos.

En el ejemplo que se muestra a continuación la sobretensión temporal ha sido del 115 % del valor nominal con una duración inferior al segundo:

**Figura 8. Sobretensión temporal**



Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995

La causa principal de las sobretensiones suele ser por un defecto en la red general de distribución o en una instalación de un consumidor y desaparece en el momento de la eliminación del defecto. No suele ser tan común como los huecos.

Estas sobretensiones, sobre todo las transitorias, pueden venir también provocadas por condiciones atmosféricas como los rayos, pudiendo incorporar una fuerte carga de energía.

En las subestaciones de tracción se incorporan autoválvulas para proteger la instalación de estas sobretensiones que pueden provocar en su caso graves daños y la interrupción del servicio.

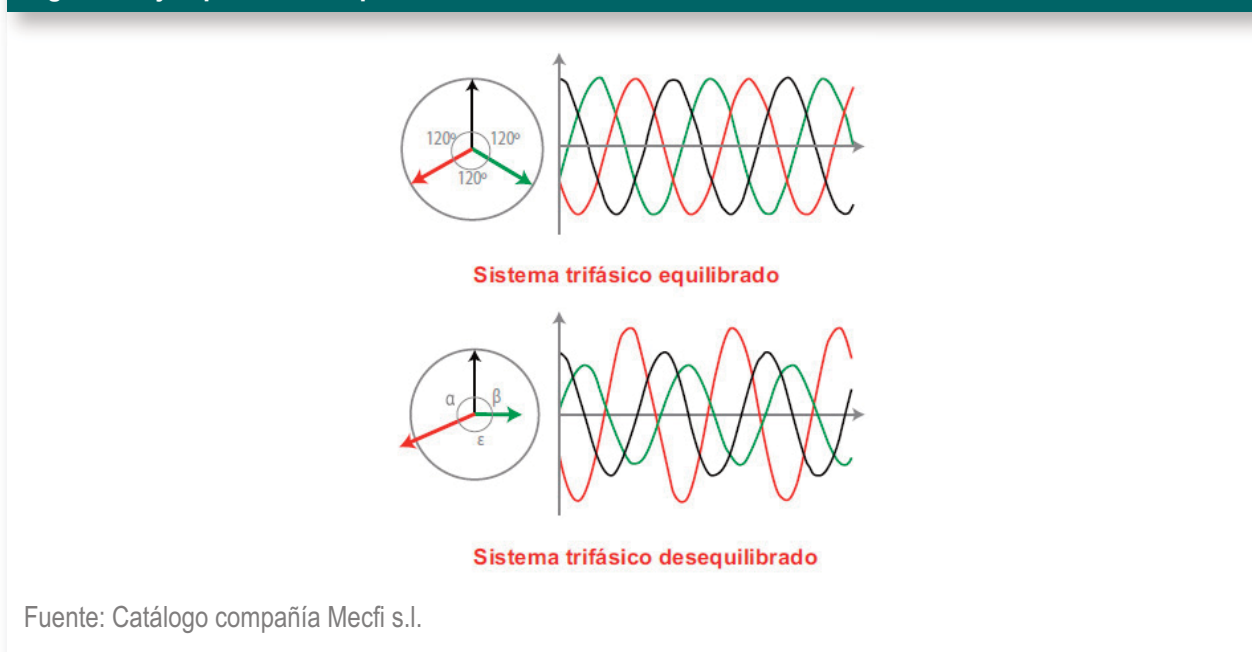
A continuación, se van a analizar con más detalle los parámetros de calidad que pueden verse más afectados por las cargas no lineales presentes en la explotación ferroviaria, sobre todo la tracción eléctrica de un tren, y que puede afectar incluso en la calidad de la onda de la energía vertida a la red de suministro: los desequilibrios, los armónicos y los flickers.

#### d) Desequilibrio de tensión

El sistema trifásico de tensión o corriente está perfectamente equilibrado cuando sus tres fases (0,4,8) se encuentran desfasadas  $120^\circ$  entre ellas y los módulos de los vectores tienen igual módulo.

El desequilibrio se produce, según la norma EN 50160, cuando el módulo de estos vectores no es el mismo, no están desfasados los  $120^\circ$  o ambas cosas a la vez. Los desequilibrios tienen unos umbrales que no deben sobrepasarse.

Figura 9. Ejemplo de Desequilibrio



La causa principal del desequilibrio en una red trifásica es la distinta potencia de las cargas monofásicas conectadas al sistema trifásico.

En el sistema ferroviario la red de suministro es trifásica y la alimentación de tracción, en las líneas de alterna, supone una carga monofásica que se carga sobre dos fases de la red de transporte.

En la subestación de tracción ferroviaria en corriente alterna el primario del transformador de tracción se conecta a dos fases de la red de suministro, creando de esta forma en el secundario una fuente monofásica de 25 kV c.a. y 50 Hz en el sistema de 1 x 25 y de +-25 kV ca 50 kHz para el sistema de 2x25.

Esta topología puede provocar importantes desequilibrios de corrientes en el sistema, que puede suponer importantes niveles de desequilibrios de tensiones a la red de transporte.

**Las consecuencias del desequilibrio** es que modifica la corriente en el neutro y afecta considerablemente a motores trifásicos conectados a la red desequilibrada que puede suponer calentamiento de los mismos y por tanto reducir su ciclo de vida útil.

**Los límites admisibles del desequilibrio**, la medida y/o cálculo se realizará de acuerdo con la Norma IEC 61000-4-30, apartado 5.7. Se evalúa por el método de las componentes simétricas:

$$\text{Tasa de desequilibrio } V\mu(\%) = (\text{Componente Inversa de la tensión} / \text{componente directa de la tensión}) \times 100$$

También se podrá conocer el valor de los desequilibrios, mediante una estimación aproximada entre el cociente de la potencia consumida y la potencia de cortocircuito de la red de transporte.

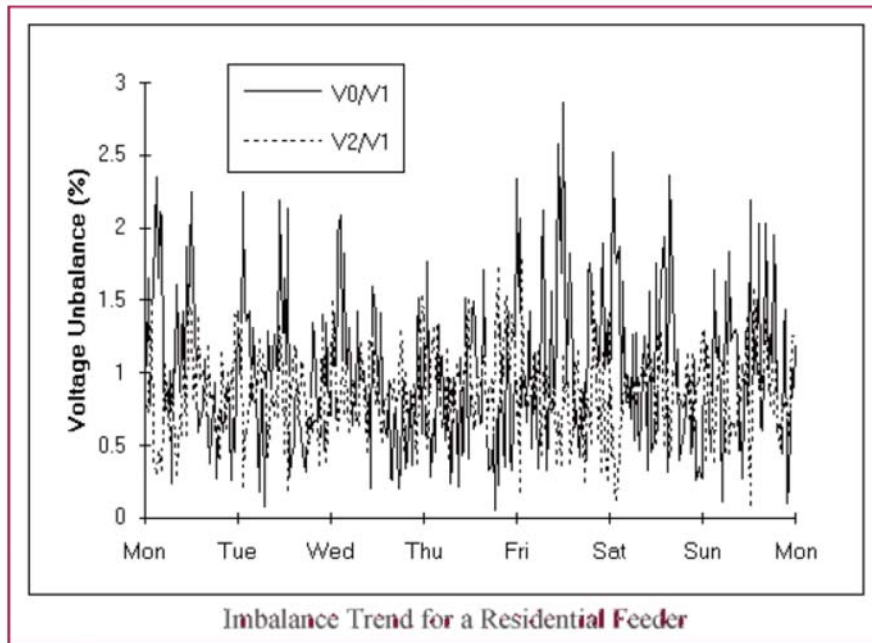
La norma EN 50160 establece para baja y media tensión los mismos límites. En el período de tiempo de 1 semana, el 95% de los valores eficaces promediados cada 10 minutos de la componente inversa de la tensión de alimentación, debe situarse entre el 0 y el 2 % de la componente directa. En ciertas regiones equipadas con líneas parcialmente monofásicas o bifásica este valor se puede aceptar que llegue al 3%.

**Tabla 5. Umbrales del desequilibrio de tensión**

	Niveles de tensión	Máximo valor periodo observación 95% (integración 10 minutos)	Período de Observación
<b>NORMA EN50160:2010</b>	1 kV / 36 kV	≤ 2 %	Semanal
	36 kV / 150 kV	≤ 2 %	Semanal
<b>REQUISITOS CONEXIÓN REE</b>	>= 200 kV	Corta duración (10 min) ≤ 0,7 % Muy corta duración (3 seg) ≤ 1 %	Semanal

En el ejemplo que se ilustra a continuación se puede observar cómo el “Viernes” se produce un desequilibrio que supera el 2 % entre las tensiones de dos fases (V0 y V1).

**Figura 10. Medida del desequilibrio entre las distintas fases de un red trifásica**



Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159

#### e) Tensiones armónicas

La norma EN 50160 define la tensión armónica como “una tensión sinusoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación”, para el caso de España la frecuencia fundamental es de 50 Hz.

Lo que importa a nivel individual es conocer la amplitud relativa de la armónica respecto a la tensión fundamental, lo que se conoce como tasa de distorsión armónica de tensión (HD) que es el cociente entre el valor eficaz de la tensión armónica y el valor eficaz de la tensión nominal a la frecuencia fundamental.

Y a nivel global se debe medir lo que se conoce como Tasa de distorsión armónica total de Tensión (THD) que tiene el valor de la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de la distorsión de todos los armónicos hasta el orden 40, todo ello dividido por el valor eficaz de la tensión nominal a la frecuencia fundamental.

**La causa principal de los armónicos:** es la presencia de cargas no lineales conectadas en los distintos niveles de tensión de la red de alimentación.

Es un problema que se está agudizando en nuestros días porque ha aparecido con cierta importancia con la aparición de sistemas electrónicos en la red de consumidores y de cargas no lineales como compresores, bombas, equipos de aire acondicionado,... y en la explotación ferroviaria la tracción eléctrica donde el rectificado de la tensión alterna y su posterior modulación/conversión con convertidores de frecuencia supone la generación de una importante tasa de armónicos que a la postre supone una considerable distorsión de la onda de tensión.

**Las consecuencias de la presencia de armónicos:** es el aumento de la temperatura de los transformadores sumergidos en aceite. Según el estudio realizado por (Vasquez Stanescu Carmen Luisa, 2011), en el que se analizan la influencia de las tensiones armónicas en los transformadores de distribución sumergidos en aceite, se pueden observar hasta una diferencia de 8,69% entre las temperaturas del punto más caliente de un transformador con y sin tensiones armónicas.

El aumento de esta temperatura interna en un transformador tiene como consecuencias la aceleración del envejecimiento de su aislamiento, produce gases disueltos en el aceite y por tanto reduce su rigidez dieléctrica. Ello afecta a la vida útil del transformador.

Según los estudios realizados dentro del proyecto europeo SEEDT, Selecting Energy Efficient Distribution transformers, en su informe de proyecto (Frangiskop Topalis, 2008) se informa que este calor que se produce en los transformadores suponen pérdidas de energía que en el conjunto de la Unión Europea se estima en un coste de 38 TWh/año que es la energía suministrada por 5 centrales nucleares (de los cuales 5 TWh son directamente causados por las pérdidas de energía debidos a los armónicos y a las energías reactivas). En el mismo estudio en España se consideran unas pérdidas de 3 TWh/año en los transformadores de distribución por pérdidas por calor que es aproximadamente la energía que se consume en todo el sistema ferroviario en nuestro país anualmente.

Como referencia indicar que la potencia que está desplegada en los transformadores de tracción en la red ferroviaria de ADIF es superior a los 2.000 MW a los que habría que añadir los transformadores embarcados en los trenes que permitiría evaluar las pérdidas en el sistema ferroviario y que podría ser un estudio interesante para posteriores informes en esta materia.

En la norma UNE 21428-1 se establece que del 100 % de las pérdidas de un transformador el 75 % corresponden a las pérdidas fijas (que se pueden medir en vacío) y el resto el 25 % para pérdidas variables cuando está en carga.

El coste de un transformador es: Coste de capitalización total= coste inicial+ coste pérdidas fijas x pérdidas fijas (en vacío) + coste pérdidas variables x pérdidas variables (en carga).

Por tanto, se puede concluir indicando que la presencia de armónicos supone una reducción del ciclo de vida por los efectos del aumento de temperatura en su operación y consecuentemente un aumento del coste del ciclo de vida de los transformadores de tracción.

**Límites admisibles de la tasa de armónicos:** está estandarizada en la norma IEC 61000-4-7: 2002 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4-7 - Técnicas de medida y ensayo - Guía general sobre la medición de Armónico e Inter-Armónicos e instrumentación para Sistemas de Suministro de Energía Eléctrica y equipos conectados a ellos.

El valor de los armónicos está limitado en los convenios que se han establecido y se han normalizado, para baja y media tensión, es decir hasta los 35 kV. Por una parte, se limita para el establecimiento de la calidad de la energía, por períodos de una semana, que el 95% de los valores de cada armónico no debe sobrepasar unos umbrales que están definidos en una tabla que no supera ninguno el 6% del valor de la tensión de suministro, y también se limita el valor de la tasa de armónicos TDH, que establece para un período de una semana el límite de no sobrepasar el 8% de la tensión de suministro.

La tensión interarmónica es aquella tensión sinusoidal que también está presente en la tensión de suministro, pero cuya frecuencia no es múltiplo de la frecuencia de la tensión de suministro.

La norma para la medida de Armónicos e Inter-armónicos es la IEC 61000-4-7.

**Tabla 6. Umbrales de la tasa de distorsión armónica total de tensión TDH (armónico hasta r=40)**

	Niveles de tensión	Límite para el 95 % tiempo de Observación (valores promedio 10 min)	Período de Observación
<b>NORMA EN50160:2010</b>	1 kV - 36 kV	≤ 8 %	Semanal
	36 kV – 150 kV	En estudio	
<b>REQUISITOS CONEXIÓN REE</b>	>= 200 kV	≤ 3 %	

**Soluciones de mitigación de los armónicos:** la incorporación de filtros pasivos, activos o híbridos que permitan filtrar o compensar la presencia de determinados armónicos o su módulo son otras de las soluciones que se pueden incorporar en una red eléctrica ferroviaria.

Soluciones nuevas como la fabricación de los transformadores de distribución con Tecnología de núcleo amorfo hará que la temperatura del transformador se reduzca.

#### f) Variaciones rápidas de tensión, parpadeo (FLICKER)

Este fenómeno se produce ante fluctuaciones en la tensión de alimentación y tiene como efecto “la impresión subjetiva de la fluctuación luminosa”, según la EN 50160, que percibe un observador cuando está presente en un sistema de iluminación. La intensidad de este parpadeo dependerá de la percepción del observador, del sistema de iluminación (principalmente tubos fluorescentes...) y de la intensidad de la fluctuación.

Es una forma de medir la incomodidad visual percibida por una persona ante los cambios reiterados del brillo de la iluminación causado por las fluctuaciones de la tensión de suministro.

El parpadeo es catalogado mediante el parámetro de Severidad de Parpadeo a Largo Plazo Plt, que es evaluado cada 2 horas.

La medida básica es el indicador Pst de Severidad del Parpadeo a Corto Plazo, evaluado cada 10 minutos por los sistemas y equipos que funcionan de acuerdo a la normativa IEC 61000-4-15. La severidad de parpadeo a largo plazo indicativa Plt es evaluada a partir de 12 valores de Pst consecutivos. Con el propósito de hacer pruebas o testear equipos o instalaciones, el período Pst puede ser temporalmente cambiado en las reglas en el rango de 1 a 10 minutos.

Los valores del Pst no son clasificados ni tenidos en cuenta durante intervalos en los que la magnitud de tensión de suministro exceda un límite de tolerancia de  $\pm 15\%$  del valor nominal, o que se vean afectados por Huecos de Tensión con una profundidad de más del 15 % del valor nominal.

**Las causas de los parpadeos o flickers:** es otra vez la existencia de cambios bruscos en las cargas conectadas en la red que no son lineales. En nuestro caso la cadena de tracción de un tren por ejemplo o la puesta en funcionamiento de un compresor, aire acondicionado....



### Límites admisibles de los parpadeos o flickers:

La técnica de medición de los flickers está estandarizada en la norma **IEC 61000-4-15: 2003 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4 - Técnicas de medida y ensayo - Sección 15: Flickermeter - Especificaciones funcionales y de diseño.**

La severidad de la molestia es lo que se mide como umbrales y se utiliza con el método de medida UIE-CEI del parpadeo. Para ello se mide el valor instantáneo de la tensión y a partir de ahí se obtiene el valor del parpadeo.

Tal y como indica el estudio de (Diego M Ferryra, 2013), los equipos de medida de la calidad de energía que incorporan el flicker entre sus medidas suelen utilizar el método que describe la norma CEI 868 que incorpora distintos bloques que permiten adaptar la señal de entrada, demodularla, filtros de simulación de ojo, simulación de cerebro y finalmente un módulo de análisis estadístico. Por su parte la norma CEI 555-3 establece los límites de estas fluctuaciones.

Para baja y media tensión la norma EN 50160 establece el límite aceptable de calidad de energía para un período de una semana, para el 95 % del tiempo (percentil 95%), el nivel de severidad de larga duración Plt debe ser igual o menor que 1. Para el nivel de corta duración Pst no establece limitaciones.

**Tabla 7. Umbrales de severidad del flicker**

	Niveles de tensión	Límite para el 95 % tiempo de Observación (valores promedio 10 min)	Período de Observación
<b>NORMA EN50160:2010</b>	1 kV – 36 kV	Pst (sin límites), Plt ≤ 1 %	Semanal
	36 kV – 150 kV	Pst (sin límites), Plt ≤ 1 %	Semanal
<b>REQUISITOS CONEXIÓN REE</b>	>= 220 kV	Pst ≤ 0,8 % Plt ≤ 0,6 %	Semanal

## 10. EQUIPOS DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGIA

El marco legal en el Real Decreto 1995/2000 establece en su artículo 104 que el consumidor tendrá derecho a instalar a su cargo un sistema de registro de medida de incidencias de calidad de servicio, debidamente precintado, al objeto de confrontar los valores aportados por las empresas distribuidoras. La instalación y precintado de este sistema deberá contar con el previo acuerdo de ambas partes, adoptado por escrito.

Hay disponibles en el mercado una amplia gama de equipos (DEI, dispositivos electrónicos inteligentes) que miden la calidad de suministro de energía eléctrica también denominados “Analizadores de Calidad de Energía”.

Tienen una alta capacidad de cálculo y almacenamiento de datos que permiten medir la tensión, intensidad, frecuencia y desfase entre ambas magnitudes a la vez que les permite calcular al menos estos parámetros de calidad de la energía:

- Variaciones de Frecuencia
- Cambios rápidos de Tensión
- Flicker (Parpadeo)
- Huecos de Tensión
- Interrupciones de Tensión
- Sobretensiones Temporales
- Sobretensiones Transitorias
- Desequilibrios de Tensión
- Tensiones Armónicas
- Tensiones Interarmónicas
- Señales de transmisión en la Red

Utilizan los estándares IEC 61000 para medir y proporcionar los parámetros de calidad e incorporan grandes capacidades de interconexión a redes de comunicaciones.

Una gran cantidad de fabricantes están ofreciendo este tipo de equipamiento y se encuentran a un precio de adquisición muy asequible para el servicio que ofrecen.

## 11. CONCLUSIONES

La energía eléctrica es vital para la sociedad actual, para su desarrollo económico y para garantizar el bienestar.

Sin embargo, la proliferación de nuevos equipos electrónicos está afectando a la calidad de la energía ocasionando una distorsión en su forma de onda que provoca efectos como el calentamiento de los equipos y transformadores de distribución a la vez que suponen interrupciones del suministro con afección a la producción.

La Administración, siendo consciente de la importancia de la calidad del suministro eléctrico ha intervenido incorporando una regulación a los parámetros más significativos de la calidad de la energía suponiendo para las compañías eléctricas importantes compensaciones económicas a los consumidores de no cumplir con los umbrales regulados.

Sin embargo, en el sector ferroviario, que utiliza en una proporción superior al 80 % la energía eléctrica en la tracción de los trenes, y que consume aproximadamente el 1,5 % de la energía eléctrica de nuestro país, no se dispone aún de un marco legal específico que aborde y defina los umbrales de los niveles de calidad de la energía que han de suministrarse al tren eléctrico ni tampoco en los puntos de suministro de alta tensión en las subestaciones de Alta Velocidad, sin embargo se están desarrollando acuerdos entre las partes que es una primera aproximación a la regulación que se pueda producir.

En el artículo se ha realizado una aproximación tentativa a lo que podría ser parámetros extrapolables respecto a los actualmente vigentes en baja y media tensión que han sido regulados por un Real Decreto y una Orden Ministerial en los últimos años en nuestro país.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Diego M Ferryra, A. D. (2013). *Calidad de Energía: Medición de parpadeo (flicker) en una instalación urbana*.
- [2] Francisco Manrique, M. A. (2014). *ADIF Energía*.
- [3] Joaquin Melendez, S. H. (Marzo 2005, nº 360). Calidad de Onda en el servicio eléctrico. *Automática e Instrumentación*.
- [4] Juan Carlos Campo Avella, E. L. (2007). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Colombia: Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente.
- [5] Vasquez Stanescu Carmen Luisa, N. E. (2011). *Influencia de las tensiones armónicas en el comportamiento térmico de los transformadores de distribución sumergidos en aceite*.
- [6] Impacto de los sistemas ferroviarios sobre las redes eléctricas de potencia: desequilibrio. 2006. Aller JM, Alves R, Bueno A, Cova M, Pesse G, Ravelo O, Rivas R, Toledo M, Puerto de la Cruz. VIII Congreso Instalaciones Eléctricas
- [7] Calidad de Energía: Medición de parpadeo (flicker) en una instalación urbana 2013
- [8] Calidad de Onda en el servicio eléctrico. Marzo 2005, nº 360. *Automática e Instrumentación*
- [9] Influencia de las tensiones armónicas en el comportamiento térmico de los transformadores de distribución sumergidos en aceite.
- [10] Strategic for development and diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers. Project report 2008
- [11] REE 2010 Instalaciones conectadas a la red de transporte peninsular: requisitos mínimos de diseño y equipamiento. Referencia: TI.E/02/040
- [12] Procedimiento de Operación del sistema P.O.-1.4 Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema. BOE núm 197, 18/08/1998.
- [13] EN 50160:2010 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.
- [14] IEEE 1159: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
- [15] IEC 61000-4-7: 2002 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4-7 - Técnicas de medida y ensayo - Guía general sobre la medición de Armónicos e Inter-Armónicos e instrumentación para Sistemas de Suministro de Energía Eléctrica y equipos conectados a ellos.
- [16] IEC 61000-4-15: 2003 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4 - Técnicas de medida y ensayo - Sección 15: Flickermeter - Especificaciones funcionales y de diseño.
- [17] IEC 61000-4-30: 2003 Compatibilidad electromagnética (EMC) Parte 4-30 - Técnicas de medida y ensayo - Métodos para la medición de la Calidad de la Energía.

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 2016**  
**número 11**

**Aplicaciones de apoyo a la explotación implantadas en Puestos de Mando de ferrocarriles**

*Juan Carlos Enrique Gordillo*

**La alta velocidad en el desierto: Haramain High Speed Railway Line (HHSRL). Propuesta de medidas ecológicas de defensa de la plataforma de vía frente a la acción del viento**

*Luis Fort López-Tello*

**Neoballast: Desarrollando el balasto del futuro**

*N. Manzo Costanzo, A. López Pita, V. Fontserè, J.A. Casado, I. Carrascal, S. Diego*

**Propuesta de aplicación de una Red Eléctrica Inteligente "Smart-Grid" a la Red Eléctrica Ferroviaria Española**

*Israel Herrero Sánchez*

**Estudio de la calidad de la energía en el sistema eléctrico y su aplicación al sistema ferroviario**

*Antonio Berrios Villaba*



FUNDACIÓN DE LOS  
FERROCARRILES  
ESPAÑOLES