



- Materiales modificados con el fin de aminorar la génesis y/o propagación de vibraciones y/o ruido en una explotación ferroviaria
- Repaso general y perspectiva tecnológica futura de la infraestructura de tracción ferroviaria (I)
- Aplicación de la metodología RCM al mantenimiento de los motores de agujas en Metro Ligero Oeste
- Propuesta para el desarrollo de la red de alta velocidad en EE.UU. (USHRS)
- Red de alta velocidad de EE.UU. (USHRS). Trayecto intercostas San Francisco - Washington D.C. (Lado Pacífico)
- Silla plegable para retroceso de trenes



Edita:



Consejo asesor:

Rosa Isabel Aza Conejo
Catedrática Escuela de Ciencias Empresariales, Univ. de Oviedo

Ignacio Barrón de Angoití
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 Rodríguez
Presidente de Fundicot

Juan Miguel Sánchez García
Asesor de Logística M. Fomento

Jordi Viñolas Prat
Director Escuelas Ingeniería y Arquitectura Universidad Nebrija

Vía Libre Técnica - investigación ferroviaria

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

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

La revisión de los artículos de los números ordinarios corresponde al Consejo Asesor de la revista, mientras que las de los números extraordinarios se entiende asumida por el jurado en el caso de los premios, por el comité científico del congreso o por el grupo de investigadores en el caso de proyectos. En cualquier caso en el número correspondiente se publican los nombres de los responsables.

Las opiniones expresadas en los artículos corresponden exclusivamente a sus autores, a los que pertenece la propiedad intelectual del trabajo.

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

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

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

Edita:

Fundación de los Ferrocarriles Españoles
ISSN: 2174-0194

SUMARIO

Materiales modificados con el fin de aminorar la génesis y/o propagación de vibraciones y/o ruido en una explotación ferroviaria	5
<i>Modified materials to mitigate the production and/or propagation of vibrations and/or noise during train passing</i>	
<i>Laura Montalbán Domingo y Julia Real Herraiz</i>	
 Repaso general y perspectiva tecnológica futura de la infraestructura de tracción ferroviaria (I)	 17
<i>General review and future perspective of railway traction infrastructure (I)</i>	
<i>José Conrado Martínez Acevedo</i>	
 Aplicación de la metodología RCM al mantenimiento de los motores de agujas en Metro Ligero Oeste	 35
<i>Application of the RCM methodology to the maintenance of the point machines in the West Light Rail Lines</i>	
<i>Juan Ignacio Romero y Óscar Díez Bayón</i>	
 Propuesta para el desarrollo de la red de alta velocidad en EE.UU. (USHSRS)	 49
<i>Proposal for the development of the U.S. high speed railway (USHSRS)</i>	
<i>Luis Fort López-Tello y Carmen Fort Santa-María</i>	
 Red de alta velocidad de EE.UU. (USHSRS). Trayecto intercostas San Francisco - Washington D.C. (Lado Pacífico)	 69
<i>The U.S. high speed railway (USHSRS). Intercoasts way San Francisco-Washington D.C. (Pacific Side)</i>	
<i>Luis Fort López-Tello y Carmen Fort Santa-María</i>	
 Silla plegable para retroceso de trenes	 91
<i>Folding seat for trains going back</i>	
<i>Víctor Sánchez Jaén</i>	

Materiales modificados con el fin de aminorar la génesis y/o propagación de vibraciones y/o ruido en una explotación ferroviaria

Modified materials to mitigate the production and/or propagation of vibrations and/or noise during train passing

Laura Montalbán Domingo

Julia Real Herraiz

Resumen

En el presente artículo se exponen diferentes soluciones para la mitigación de las vibraciones y/o ruido producidos durante las operaciones ferroviarias. Todas estas medidas están basadas en el uso de nuevos materiales modificados que han mostrado su gran capacidad de atenuación de estas externalidades. Entre ellos destaca el uso de material bituminoso modificado con determinados aditivos procedentes de materiales residuales (NFU y plásticos) destinados a la atenuación de la transmisión y propagación de las vibraciones así como el uso de nuevos modificadores de fricción en el contacto rueda-carril cuyo objetivo es atenuar la generación del ruido.

Así pues, con la introducción de estos nuevos materiales en diferentes puntos del diseño de la infraestructura tradicional del ámbito ferroviario para el que han sido diseñados cada uno de ellos, se consigue un aumento de la sostenibilidad y competitividad del sector ferroviario necesario para situar este modo de transporte como uno de los principales en el ámbito urbano.

Palabras clave: Atenuación de vibraciones; nuevos materiales; ferrocarril; nuevos diseños; ruido; ámbito urbano.

Abstract

As a consequence of the train passing, important vibrations and noise appear. This paper presents different new material to attenuate these vibrations and noise. These materials are bituminous mixtures with different additives coming from wastes (NFU and plastics) and a new friction wheel-rail contact modifier material. On one hand, the bituminous mixtures are used to attenuate the vibration transmission and propagation. On the other hand, the friction modifier material is used to mitigate the noise generation.

With the vibration and noise mitigation, railroad transport mode is presented as one of the most competitive and sustainable transport mode in urban area.

keywords: Vibration attenuation; new materials; railroad; new designs; noise; urban area.

1. Introducción y objetivos

El auge y la evolución continuada en la que está inmerso el transporte ferroviario de pasajeros y mercancías, impulsado por su sostenibilidad y competitividad tanto a nivel urbano como interurbano [1], son responsables de que, en la actualidad, el esfuerzo innovador se centre en la búsqueda de nuevos diseños de vías de ferrocarril de altas prestaciones, capaces de permitir el tránsito de vehículos ferroviarios a una mayor velocidad así como material rodante con una carga por eje cada vez más elevada [2]. Esa evolución continuada hacia vías de altas prestaciones debe ir siempre acompañada de la reducción de las externalidades asociadas a este sector de transporte.

En este sentido, las externalidades más importantes del sector ferroviario en el ámbito urbano son las vibraciones y el ruido producidos durante las operaciones del material rodante. La fuerza generada en el contacto rueda-carril, debida a la propia carga así como a la existencia de singularidades tales como cambios de rigidez o posibles defectos de vía, ocasiona la generación de vibraciones mecánicas, tanto en la rueda como en el carril. Estas vibraciones mecánicas, pueden ser transmitidas a través del paquete de vía o transformadas en ruido, que a su vez se propaga por el medio. Ambos fenómenos son considerados como uno de los mayores problemas en el sector ferroviario, ya que, por una parte, generan elevadas necesidades de mantenimiento en la infraestructura y, por otra, importantes afecciones estructurales y sociales en zonas urbanas [3, 4].

A lo largo de las últimas décadas, estas consideraciones han sido el pretexto de desarrollo de numerosas investigaciones [5, 6, 7, 8] enfocadas a la obtención de soluciones que atenúen los efectos perjudiciales de las vibraciones mecánicas producidas por el ferrocarril, considerando las que se propagan tanto por el terreno (vibraciones) como por el aire (ruido). Así pues, teniendo en cuenta las conclusiones aportadas por las investigaciones previas consultadas, el presente estudio pretende mostrar los desarrollos llevados a cabo relativos a la definición de nuevos materiales destinados a mitigar las vibraciones y/o el ruido ferroviario, por medio de la actuación directa sobre la vía o sobre el contacto rueda-carril ya que, sólo actuando sobre el foco emisor y/o sobre la transmisión y propagación será posible conseguir la mitigación de las vibraciones y el ruido, y por lo tanto, el incremento en sostenibilidad que necesita el sector ferroviario para ser uno de los modos de transporte más competitivo en el ámbito urbano.

Con esta finalidad, se desarrollan los proyectos de investigación I+D+i “Subbalasto bituminoso con NFU”, “BITUTRAN” y “OVER RAIL”, cuyo objetivo principal es la obtención de nuevos materiales con características técnicas mejoradas y elevada capacidad atenuadora de vibraciones y/o ruido de rodadura.

Además de este objetivo principal, debe tenerse en cuenta que en algunos de estos proyectos se han utilizado aditivos procedentes de residuos, con el fin de buscar, a partir del uso de materia prima barata, las características deseadas en los nuevos materiales desarrollados. De esta forma, se consigue obtener un material respetuoso con el medio ambiente que a su vez presenta unas altas características técnicas.

En este contexto, el artículo ofrece una visión general del problema derivado de las vibraciones y ruido asociados a las operaciones del ferrocarril, así como el estado actual del conocimiento sobre las soluciones propuestas para la mitigación de las mismas. Tras ello, se presentan los proyectos antes mencionados así como los nuevos materiales obtenidos en cada uno de ellos.

2. Estado del conocimiento actual

Los efectos derivados de la generación de vibraciones mecánicas son un problema presente en las redes ferroviarias, siendo el ruido y las vibraciones dos de las principales externalidades que se producen cuando la infraestructura ferroviaria se encuentra en ámbito urbano [1].

Las vibraciones mecánicas tienen su origen en la fuerza de contacto rueda-carril que se produce al paso del material rodante (Figura 1). En función de la velocidad de circulación, la carga por eje y las características de los defectos presentes en la rueda y/o carril, las vibraciones mecánicas producidas tendrán una frecuencia y amplitud determinada. Por otra parte, dependiendo del medio por el cual se propaguen reciben un nombre distinto: si éstas se transmiten por medio del paquete de vía hacia el terreno, reciben el nombre genérico de *vibraciones*, mientras que si su medio de propagación es el aire, se las designa como *ruido* [4, 5, 6].

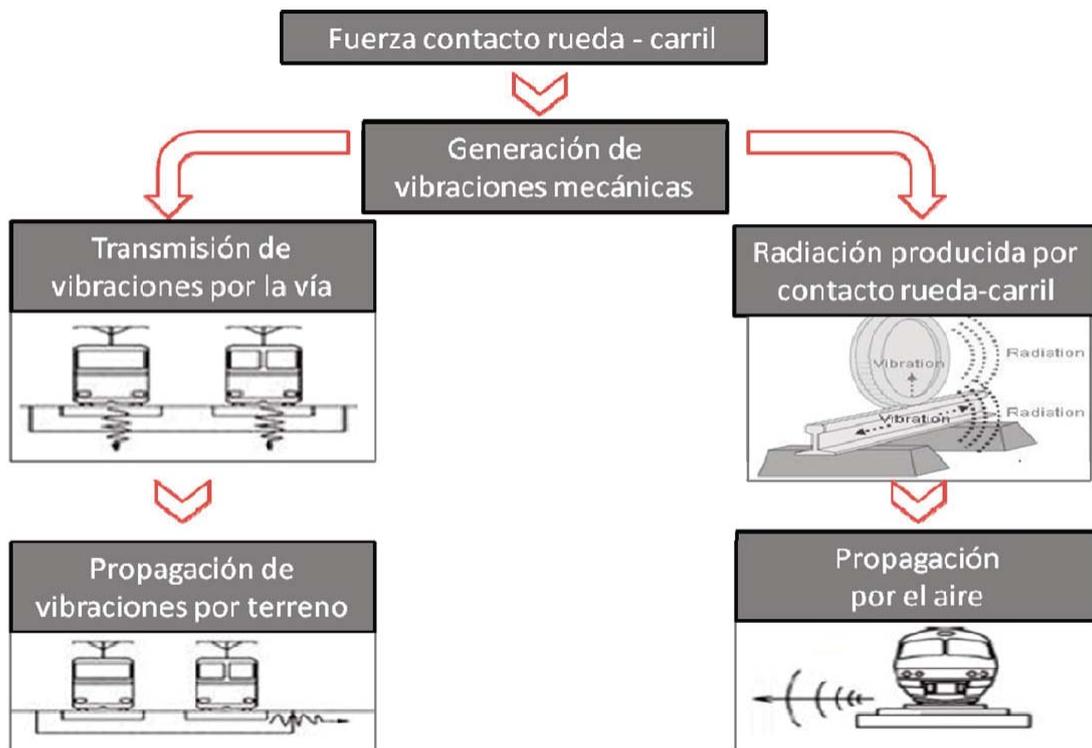


Figura 1 Esquema generación, transmisión y propagación de las vibraciones mecánicas debidas a la circulación ferroviaria.

En los últimos años, los investigadores del sector ferroviario han llevado a cabo numerosos estudios orientados a la mitigación de las vibraciones, centrándose en la obtención y diseño de medidas atenuadoras aplicadas tanto en la fuente de vibración como en el medio de transmisión y/o de propagación [6, 7, 8]. Como ejemplo de estas medidas de atenuación de vibraciones pueden destacarse:

- Mayor mantenimiento de ruedas y carriles.
- Ejecución de vías en placa flotantes.
- Empleo de subbalasto bituminoso.
- Construcción de zanjas de atenuación de propagación de vibraciones.
- Disposición de barreras acústicas.

Atendiendo a la atenuación del ruido de rodadura, también existen algunas medidas destinadas a la reducción del mismo aplicadas sobre el contacto rueda-carril [6, 9]; como son:

- El uso de ruedas elásticas.
- Amolado frecuente de los carriles.
- Uso de lubricantes como grasas y aceites aplicados sobre el carril.

3. Soluciones propuestas

En el ámbito de estudio del presente artículo se proponen distintas soluciones, para ámbitos concretos de explotación, basadas en la implantación de nuevos materiales en diferentes puntos del diseño de vía tradicional con el objetivo de disminuir las vibraciones y/o el ruido producidos por el paso repetido de los vehículos ferroviarios actuando sobre el máximo rango de frecuencias posible, de forma que se convierta en un modo de transporte más competitivo a la vez que sostenible.

De esta forma, los proyectos de investigación de I+D+i “Subbalasto bituminoso con NFU” y “BITUTRAN” buscan el desarrollo de soluciones que actúen mitigando las vibraciones transmitidas y propagadas a través del paquete de vía y “OVER-RAIL” busca el desarrollo de un nuevo modificador de la fricción de modo que, actuando en el contacto rueda-carril, se disminuya la generación del ruido de rodadura.

A continuación, se detalla cada uno de los objetivos perseguidos en cada uno de los proyectos, así como el estudio realizado y la solución final propuesta para el fin perseguido.

3.1. Proyecto Subbalasto Bituminoso con NFU

Objetivo

El proyecto SUBBALASTO BITUMINOSO CON NFU, financiado por el CDTI y desarrollado por las empresas OCIDE, AMINSA, AGLOMERADOS LOS SERRANOS, INTERCONTROL y la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, como ente subcontratado, nació con la intención de buscar una alternativa sostenible y económicamente competitiva al subbalasto granular.

Estudio

El subbalasto granular es una capa formada por material granular, procedente de canteras acreditadas, encargada de reducir las tensiones que llegan a la plataforma ferroviaria debido a la carga transmitida por el tráfico ferroviario. Además de esta función fundamental, el subbalasto granular también ha de ofrecer protección frente a las heladas, drenar el agua así como realizar función de filtro para evitar la migración de finos desde la plataforma a la capa de balasto.

Teniendo en cuenta tanto las funciones que debía de satisfacer como las limitaciones que debía superar, en el proyecto se llevó a cabo un estudio exhaustivo de los posibles materiales susceptibles de sustituir esta capa granular. De entre todas las alternativas estudiadas y caracterizadas en laboratorio se concluyó que la mejor opción era una mezcla bituminosa diseñada específicamente para el ámbito ferroviario y en cuya dosificación se incorporó un determinado porcentaje de neumático fuera de uso (NFU) por vía seca.

Obtenido el material a emplear, se realizó un estudio para la obtención del espesor óptimo. Con esta finalidad, se comparó el estado tenso-deformacional obtenido a partir de un análisis numérico para diferentes espesores, seleccionando como óptimo aquel que presenta unos asientos y tensiones en distintas

capas del paquete de vía similares a los obtenidos con el subbalasto granular. Finalmente, se comprobó la resistencia de la solución obtenida frente a fatiga garantizando que la solución seleccionada no presenta problemas de durabilidad frente al tráfico para el que fue diseñada.

Solución

La solución finalmente propuesta por el proyecto subbalasto fue la ejecución de una capa de 9 cm de espesor formada por mezcla bituminosa caliente con NFU por vía seca, de forma que ésta hiciera las funciones de subbalasto [10]. Como ejemplo, se dispone a continuación la Figura 2, en la que se puede observar la ejecución del nuevo subbalasto bituminoso.



Figura 2 Colocación en obra del nuevo subbalasto bituminoso.

Esta nueva mezcla bituminosa presentó un coste más elevado que el subbalasto granular, debido principalmente al elevado coste del ligante bituminoso. Como estimación inicial a fin de concretar más el precio final de comercialización del nuevo material, se estimó que el material extendido presenta un coste 5 veces mayor que el subbalasto granular, siendo el coste de ejecución de una vía doble 1.5 veces el de un subbalasto granular. Finalmente, teniendo en cuenta tanto el coste de ejecución de una vía doble como el coste de transporte, se estimó que el coste de la nueva solución podía ser igual o incluso menor que el ofrecido por la solución del subbalasto granular cuando las distancias de transporte sean superiores a 60 km.

Por otra parte, se descubrió en laboratorio que, debido a la incorporación de este nuevo material a la mezcla bituminosa, se conseguía un incremento de la visco-elasticidad de la mezcla y, por lo tanto, una mejora de la capacidad atenuadora de vibraciones a la vez que se garantizan las exigencias tenso-deformacionales que se le exigen a esta capa.

De esta forma, se consideró que el subbalasto bituminoso con NFU obtenido es una importante solución para la sustitución del subbalasto granular en el diseño de la vía tradicional debido a que con un precio de ejecución similar se obtenía:

Importante reducción de las vibraciones transmitidas por el paquete de vía (Figura 1) mitigando su propagación por el terreno (Figura 3). De este modo, se consiguió disminuir las afecciones sociales y daños a estructuras colindantes en el ámbito urbano al mismo tiempo que se aumentó la vida útil de la infraestructura, con el consiguiente beneficio y reducción de los costes de mantenimiento.

Dado que el espesor del nuevo subbalasto era 2/3 menor que el del subbalasto granular, se necesitó menor cantidad de material y por lo tanto, se produjo un importante beneficio medioambiental.

Valor añadido de la reutilización y revalorización de residuos, en este caso, del polvo de caucho procedente de los neumáticos fuera de uso (NFU).

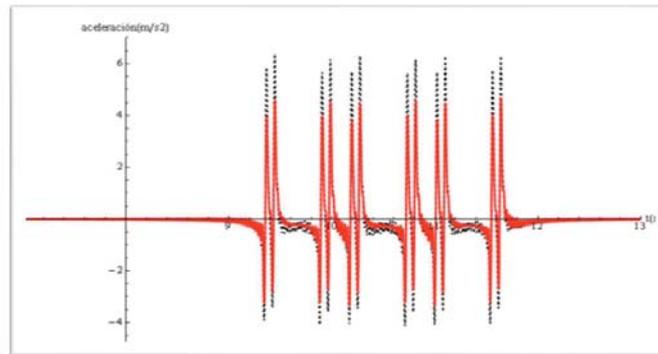


Figura 3 Atenuación de vibraciones conseguida con el nuevo subbalasto bituminoso. En negro vibraciones producidas considerando vía con subbalasto granular y en rojo el caso de subbalasto bituminoso.

3.2. Proyecto BITUTRAN

Objetivo

El objetivo principal del proyecto “BITUTRAN”, financiado por el CDTI, fue el desarrollo de un nuevo concepto de vía en placa para ámbito ferroviario con una elevada capacidad atenuadora de vibraciones. Para ello, el nuevo concepto de vía en placa se diseñó íntegramente con un nuevo material que fuera capaz de sustituir al hormigón de la vía en placa tradicional. De este modo, con la variación del material base a emplear, se obtuvo una importante atenuación de la transmisión de las vibraciones en el paquete de vía con las condiciones de seguridad suficientes para garantizar un correcto funcionamiento estructural de la misma.

Estudio

Las entidades participantes en el proyecto (AGLOMERADOS LOS SERRANOS, PROVER, LAENSA y la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, como ente subcontratado), realizaron un completo estudio de caracterización de una amplia gama de materiales susceptibles de ser empleados para el fin propuesto, de forma que de ellos se seleccionó aquel con unas características óptimas tanto para garantizar un buen comportamiento tenso-deformacional de la vía en placa como una elevada capacidad de atenuación de las vibraciones. En este sentido, se propuso una mezcla bituminosa con aditivos capaz de proporcionar

a la vía una capacidad portante suficiente para garantizar el buen comportamiento estructural de la misma y, al mismo tiempo, capaz de obtener una elevada atenuación de los rangos de frecuencias vibratorias características del ámbito tranviario.

Al igual que para la selección del material a emplear, se realizó también un completo estudio de los aditivos disponibles para obtener las características técnicas buscadas. En este caso concreto, se seleccionó un tipo concreto de plastómero por dos motivos esenciales:

Obtener un elevado ángulo de fase para obtener un factor de amortiguamiento óptimo y por lo tanto, aumentar de forma considerable la capacidad de atenuar las vibraciones de la misma.

Mejorar el valor del módulo complejo ofrecido por la mezcla bituminosa y por lo tanto, un comportamiento tenso-deformacional de la vía en placa bituminosa que garantice la seguridad durante las operaciones ferroviarias.

Una vez realizada la selección tanto del material como del aditivo a emplear para conseguir el fin propuesto, se realizó una extensa campaña experimental considerando dos tipos de mezclas bituminosas, mezclas tipo hormigón bituminoso y mezclas tipo Stone Mastic Asphalt (SMA), con distintos porcentajes de plastómeros reciclados cada una de ellas.

Finalmente, a partir de la caracterización física y mecánica de cada una de las mezclas analizadas, se seleccionó como material a utilizar para la ejecución de la vía en placa bituminosa aquel que, con un coste más económico, presentó la máxima atenuación de las vibraciones junto con un comportamiento tenso-deformacional óptimo.

Solución

La solución fue una mezcla bituminosa a la que se le añadió plastómeros por vía seca, de forma que ésta sustituyera al hormigón en el nuevo concepto de vía en placa formada íntegramente por mezcla bituminosa [11, 12]. En la Figura 4 puede verse la nueva vía en placa bituminosa diseñada, la cual, gracias a la colaboración de FGV y EIGE, fue probada en un tramo de vía real de la red tranviaria de Alicante, entre un tramo de vía en placa de hormigón con adoquinado y un tramo de vía en balasto. Gracias a las pruebas realizadas in situ se pudo comprobar el óptimo comportamiento tanto estructural como vibratorio.



Figura 4 Ejemplo banco de pruebas proyecto Bitutran.

Como evaluación económica de la solución obtenida, se compara el coste económico de esta solución con la tradicional losa de hormigón, losa de hormigón con manta en la parte inferior o bien losa de hormigón con adoquín y manta (Tabla 1).

Tabla 1 Valoración económica solución propuesta en comparación con otras vías en placa.

€/m LOSA HORMIGÓN	100
€/m LOSA HORMIGÓN CON MANTA	143
€/m HORMIGÓN CON ADOQUÍN CON MANTA	168
€/m BITUTRAN	144

De esta valoración económica, se deduce que la solución propuesta presenta un coste más elevado que la solución de vía en placa de hormigón tradicional; no obstante, su coste es inferior o igual al que se obtiene cuando se coloca cualquier sistema actual de atenuación de vibraciones en vías en placa. De esta forma, considerando su coste junto con la elevada capacidad de atenuación de vibraciones que presenta la solución propuesta y el valor añadido de la misma al revalorizar los residuos, se tiene que la vía en placa bituminosa es la solución más competitiva a implantar en aquellos puntos de la red tranviaria donde se requiere un sistema de atenuación de las vibraciones.

Así pues, con esta nueva solución se obtuvo la mitigación de las vibraciones transmitidas y propagadas con una frecuencia de onda entre los 2 y los 80 Hz que son las que principalmente afectan al ser humano, obteniendo una reducción importante de las vibraciones transmitidas. Como ejemplo, según los modelos numéricos, se calculó una reducción de las aceleraciones verticales positivas del 42% y una reducción del 47% en las aceleraciones verticales negativas para el caso de una vía en placa bituminosa en comparación con una vía en placa de hormigón tradicional. En cuanto a los ensayos desarrollados in situ en el banco de pruebas, se obtuvo una reducción del 20% en los tiempos empleados en la disipación de las aceleraciones producidas, de la nueva vía en placa bituminosa respecto de la vía en placa de hormigón.

3.3. Proyecto OVER RAIL

Objetivo

La reducción del ruido de rodadura producido por la circulación ferroviaria debido a la rigidez existente en el contacto rueda-carril ha motivado la participación de KRYPTON CHEMICAL, TECSA, ADIF, AIDICO y la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA en el desarrollo del proyecto Over-Rail, financiado por el MINECO, cuyo objetivo está siendo la obtención de un nuevo producto capaz de minimizar el ruido de rodadura gracias a la búsqueda del coeficiente de fricción óptimo en el contacto rueda-carril.

Estudio

Para llevar a cabo el desarrollo del mencionado producto, se realizó una profunda investigación del mecanismo de generación del ruido de rodadura para poder obtener la caracterización del mismo, así como de los materiales susceptibles de ser utilizados para su paliación.

En lo que se refiere a los mecanismos de generación de ruido, debe distinguirse entre dos fenómenos. Por un lado, el denominado rolling noise es el que se produce predominantemente en recta, debido a la rugosidad y a las imperfecciones en el contacto rueda carril. Por otro lado, el denominado squealing noise (o chirrido) se produce en curvas, y se debe al deslizamiento de la rueda sobre el carril. Por lo tanto, la actuación sobre la superficie del carril de forma que se reduzcan las imperfecciones en recta y se regule el coeficiente de fricción en curva, constituye la solución para la mitigación del ruido de rodadura en la propia fuente y para ello debe buscarse el material más adecuado capaz de cumplir estos objetivos, entre otros.

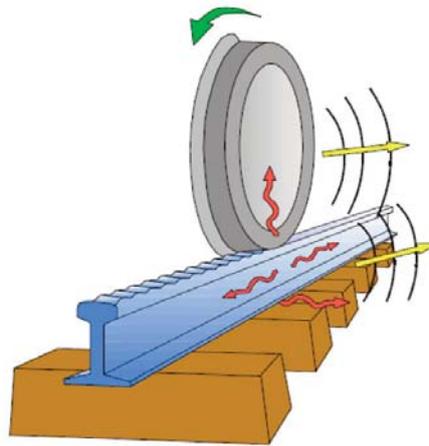


Figura 5 *Generación y radiación del ruido debido al contacto rueda-carril.*

Así pues, de todos los materiales estudiados, se está seleccionando para el diseño del material aquel que admita unas tensiones normales y tangenciales adecuadas para la elevada fuerza de contacto rueda-carril así como una buena resistencia a los cambios de temperatura. Por otra parte, el material seleccionado debe cumplir con las exigencias químicas particulares de modo que se obtenga un material resistente a UV, a aceites, grasas, agua y fuego, manteniendo la característica básica de conducción de electricidad, para permitir el cierre del circuito de vía. Otras variables tenidas en cuenta serán la velocidad de aplicación y secado del material, de forma que éste pueda ser dispuesto sobre los carriles con un sistema mecánico móvil.

Solución

La solución del proyecto Over-Rail será un innovador producto que garantice un óptimo comportamiento frente a las acciones mecánicas, químicas y eléctricas, al mismo tiempo que, aplicando el producto sobre la banda de rodadura, consiga regular la fricción, dentro de los límites de seguridad, en el contacto rueda-carril. De esta manera, se conseguirá una disminución de las vibraciones mecánicas producidas durante las operaciones ferroviarias y, por lo tanto, la emisión acústica asociada.

Además de la innovación obtenida con este nuevo material, se conseguirá una serie de ventajas adicionales respecto de las soluciones que se han utilizado, hasta hoy, para disminuir el ruido producido durante las operaciones ferroviarias. Así pues, se destacan las siguientes ventajas que se pretende que la nueva solución satisfaga:

- Aplicación y efecto directo sobre el foco generador de ruido.
- Fácil aplicación mediante el uso de sistemas flexibles y transportables.

- Renovación del material en línea de forma sencilla, lo que se traduce en mayor durabilidad.
- Posibilidad de colocación en tramos de carril conflictivos, ya construidos, con sencillas operaciones y aportando condiciones óptimas para una rodadura segura.
- Coste económico más reducido que el derivado de la aplicación de otras medidas atenuadoras del ruido como puede ser el caso del amolado frecuente de carriles.
- Beneficio medioambiental al utilizar productos no contaminantes como en el caso de las grasas o aceites.

4. Conclusión

En este artículo se ha presentado el fenómeno físico de las vibraciones mecánicas producidas durante las operaciones ferroviarias debidas a la fuerzas generadas en el contacto rueda-carril. Estas vibraciones mecánicas son transformadas en las principales externalidades del ferrocarril: vibraciones y ruido, los cuales han sido analizados atendiendo tanto a su generación como a su transmisión y propagación.

Estudiada la mayor externalidad del transporte ferroviario en el ámbito urbano, se ha realizado el estudio del estado del conocimiento actual en dicho ámbito analizando las diferentes soluciones existentes hoy en día para la atenuación de las vibraciones y ruido.

Una vez presentado el estado actual del conocimiento, se describen los proyectos de I+D+i desarrollados con el objetivo de obtener nuevos materiales capaces de mitigar la generación del ruido y/o la transmisión y propagación de las vibraciones cuando éstos son aplicados en distintos puntos del diseño de vía tradicional del ámbito ferroviario para el que han sido diseñados.

Como conclusión final, se tiene que tanto las vibraciones como el ruido generado durante el paso del material rodante en las líneas de ferrocarril, pueden ser disminuidos mediante la adopción de diferentes medidas, aplicadas durante la construcción o explotación de la línea, que pueden ir destinadas a atenuar la generación del ruido o la transmisión y propagación de las vibraciones. En el caso concreto de este artículo, se propone una solución innovadora en cada uno de los proyectos de I+D+i analizados de forma que; la solución Over-Rail actúe en el foco emisor, mientras que los nuevos materiales propuestos en Subbalasto y Bitutran actúen sobre la transmisión y/o propagación de las vibraciones a través del paquete de vía.

De esta forma, mediante la aplicación de cada una de estas soluciones en su ámbito ferroviario de diseño, se conseguirá que este modo de transporte se posicione como uno de los más sostenibles y competitivos dentro del ámbito urbano.

Agradecimientos

Los autores del artículo desean agradecer la financiación recibida por parte del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España así como del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) sin la cual no se hubieran podido desarrollar los proyectos de investigación I+D+i descritos en el presente artículo.

Referencias

- [1] Puig, V., Ramos, M., Real, J et al. “Estudio del comportamiento vibratorio de diferentes tipologías de vía en ámbito urbano en la línea 4 del tranvía de Alicante”. *Vía Libre*.
- [2] Gallego I. (2006) “Heterogeneidad resistente de las vías de alta velocidad: transición terraplén-estructura”. Tesis. Universidad de Castilla-La Mancha.
- [3] Pallas, M.A., Lelong, J., and Chatagnon, R. (2011) “Characterization of tram noise emission and contribution of the noise source”. *Applied Acoustics*, Vol. 72, No.7, pp. 437-450.
- [4] Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. MRT-Productions. Delft. The Netherlands.
- [5] Real, J., Martínez, P., Montalbán, L., and Villanueva, A. (2011). “Modelling vibrations caused by tram movement on slab track line”. *Mathematical and computer modeling*, Vol. 54, No. 1-2, pp. 280-291.
- [6] Lakusic, S., and Ahac, M. (2012). “Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas”. *Tehnicki vjesnik-technical gazette*, Vol. 19, No. 2, pp. 427-435
- [7] Li, YL., Ou, YJ., Tan, YQ., and Lu, MY. (2012). “Dynamic Characteristics of Rubber Powder Modified Cement Asphalt Mortar”. *Advances in intelligent transportation system and technology. Advances Engineering Forum*. Vol. 5, pp. 243-246.
- [8] Real, J.I., Zamorano, C., Hernández, C., and Ribes, F. (2014). “Wave barriers for the reduction of railway induced vibrations. Analysis in tracks with geometric restrictions” *Journal of Vibroengineering*. Vol. 16. pp. 2821-2833.
- [9] EPA. (2013) “Rail infrastructure noise guideline”. Environmental Protection Authority. Sydney.
- [10] PCT/ES2011/070351. Material bituminoso y su uso para la construcción de subbalasto.
- [11] ES 2 403 354 B1. Composición bituminosa y su utilización para reducir las vibraciones y el ruido.
- [12] Real, T., Zamorano, C., Hernández, C. et al. (2015) “Optimized design of an asphalt mixture railway track for vibration attenuation”. *Journal of vibroengineering*. Vol. 17. No. 1. Pp. 431-443.

Repaso general y perspectiva tecnológica futura de la infraestructura de tracción ferroviaria (I)

General review and future perspective of railway traction infrastructure (I)

José Conrado Martínez Acevedo

Jefe de Área de Investigación, Desarrollo e Innovación. Dirección de Ingeniería e Innovación. ADIF
Coeditor de IEEE Electrification Magazine (Electric Trains Area)

Resumen

La tracción eléctrica continúa posicionándose como el principal tipo de tracción en los ferrocarriles de los países desarrollados. Ello está potenciando el desarrollo actual y futuro de nuevos equipos y sistemas que permitan, principalmente, la mejora de la Eficiencia Energética en la tracción, la mejora de la integración de las redes ferroviarias con las redes eléctricas generales y la mejora de la interoperabilidad de los sistemas eléctricos ferroviarios. En el presente artículo se trata expresamente qué tecnologías actuales y futuras son y serán desarrolladas previsiblemente para la mejora de la Eficiencia Energética en lo referente a la tracción.

Palabras clave: Sistema Eléctrico de Potencia, Corriente Continua, Corriente Alterna, Eficiencia Energética, Investigación y Desarrollo, Energía eléctrica regenerada.

Abstract

Electric traction continues to position itself as the main type of traction on the railways in developed countries. This is enhancing the current and future development of new equipment and systems to primarily improve energy efficiency in traction, improved integration of rail networks with general electrical networks and improving the interoperability of electric rail systems. In the present article deals specifically what current and future technologies are expected to be developed and improved energy efficiency regarding traction.

keywords: Power Electric System, DC, AC, Energy Efficiency, R&D, Electric energy regenerated.

1. Introducción

La tracción eléctrica ofrece, frente a la tracción diesel, ventajas como la posibilidad de construir vehículos de gran potencia y velocidad, mejores rendimientos desde el punto de vista del consumo energético y menor impacto medioambiental. Sin lugar a dudas, esta tracción es la tracción del presente y del futuro en los ferrocarriles, ocupando actualmente el primer lugar en los sistemas ferroviarios de los países desarrollados con la única excepción importante de los Estados Unidos de América. En los países en vías de desarrollo, este tipo de tracción es también la que tiende a instaurarse en la totalidad de sus ferrocarriles principales.

Por el contrario la tracción eléctrica requiere grandes inversiones económicas en instalaciones propias (líneas eléctricas de alimentación, subestaciones y líneas de transmisión de energía eléctrica para alimentación al tren), por lo que precisa de estudios económicos importantes. En cualquier caso, en líneas de elevadas velocidades de circulación y/o de tráfico intenso como es el caso de las líneas de alta velocidad, el empleo de energía eléctrica es siempre imprescindible.

Energía eléctrica con corriente continua y con corriente alterna

El uso de energía eléctrica en el ferrocarril a lo largo de los años, ha supuesto el desarrollo de sistemas con *corriente continua* (C/C) y con *corriente alterna* (C/A). El uso de la corriente continua vino motivado principalmente por la facilidad que suponía el uso del motor de tracción de corriente continua. Por su parte, los sistemas de corriente alterna permitían incrementar las distancias entre los puntos de consumo del ferrocarril (subestaciones de tracción) al ser más reducidas las caídas de tensión por emplear tensiones eléctricas mayores.

A diferencia de lo que ocurre con la generación de energía eléctrica en las centrales, en las que siempre se genera corriente alterna en tres ondas desfasadas (*corriente alterna trifásica*), el empleo de corriente alterna en ferrocarriles sólo utiliza una onda (*corriente alterna monofásica*).

En la infraestructura de los sistemas eléctricos ferroviarios es frecuente la modificación o conversión de la corriente entre los dos tipos anteriores, destacando:

- A.** Conversión de C/A trifásica a C/C. Este proceso se denomina rectificación y puede ser: 1) no controlada, cuando se realiza exclusivamente por diodos y 2) controlada, cuando se emplean otros semiconductores del tipo tiristor o IGBT.
- B.** Conversión de C/C a C/A trifásica. Este proceso se denomina ondulación ó inversión.
- C.** Conversión desde un nivel de tensión de C/A a otro nivel de tensión de C/A, manteniendo constante la potencia entregada y la frecuencia de trabajo. Este proceso se denomina transformación.

La conversión **C** es la que siempre se emplea en ferrocarriles alimentados en corriente alterna a frecuencia industrial mientras que la conversión **A** es la propia de ferrocarriles alimentados en corriente continua (actualmente casi siempre del tipo no controlada). La conversión **B** representa actualmente un nuevo proceso, también en ferrocarriles de corriente continua, por el cual la energía eléctrica generada en el frenado eléctrico de los trenes es recuperada y ondulada a C/A mediante un convertidor electrónico de potencia (situado en la subestación) y ser posteriormente inyectada a la red de distribución. Este proceso de conversión ha tomado importancia desde el momento en que esta energía exportada es compensada a las compañías ferroviarias en algunos países.

En todo caso y como se verá en próximos apartados, la recuperación de la energía eléctrica de frenado en redes de C/C representa actualmente una de las principales estrategias de mejora de la Eficiencia

Energética en este tipo de infraestructuras. En efecto, esta energía podrá ser inyectada a la red – según se acaba de explicar – o almacenarla para ser posteriormente utilizada. También podrá reconducirse de manera óptima en la propia línea de transmisión a los trenes para permitir que cuando un tren frena se pueda alimentar a otro que acelere.

Caso específico de la corriente continua

La corriente continua es obtenida en subestaciones de tracción eléctrica rectificadoras. Estas instalaciones son conectadas a una red de corriente alterna trifásica para después realizar dos etapas:

- Proceso de transformación, mediante un transformador que reduce la tensión de la red a otra de trabajo del rectificador.
- Proceso de rectificación, mediante un rectificador de diodos – rectificación no controlada – que acondiciona la tensión a la de alimentación del tren.

La tensión de salida del rectificador – por tanto la de alimentación al tren – ha sido muy diversa, llegando actualmente hasta los 3.000 V de tensión nominal. Otros valores normalizados en la actualidad son 750 y 1.500 V. Este tipo de electrificación es la que generalmente se emplea en ferrocarriles urbanos, metropolitanos y tranviarios.

Caso específico de la corriente alterna

La principal ventaja de este tipo de corriente es que permite emplear valores de tensión eléctrica elevados, lo que posibilita una caída de tensión menor. Si bien en el pasado existieron electrificaciones ferroviarias con corriente alterna trifásica, en la actualidad sólo se emplea la corriente alterna monofásica. El sistema trifásico se desarrolló de manera insuficiente debido, principalmente, a los graves inconvenientes que presentaban las instalaciones, sobre todo por su complejidad, tanto en lo referido a la infraestructura como al material rodante empleado. Debe considerarse que era necesario disponer de tres instalaciones independientes de alimentación eléctrica al tren – una por fase – y vehículos motores dotados de tres pantógrafos de captación.

Como consecuencia de esta situación resultaba muy atractivo el desarrollo de un sistema de electrificación en corriente alterna monofásica con alta tensión y sección conductora reducida. La corriente alterna monofásica es obtenida en subestaciones de tracción eléctrica transformadoras que se conectan a una red de corriente alterna trifásica para después realizar un único proceso de transformación. En este proceso se emplean transformadores reductores de la tensión de la red a la de alimentación del tren. Estos transformadores son especiales porque, precisamente, la tensión del devanado secundario es monofásica y no trifásica como ocurre en los sistemas de transporte y distribución.

Al igual que en los sistemas de C/C, la tensión de salida del transformador también ha sido muy diversa, siendo usualmente 15.000 ó 25.000 V de tensión nominal. La frecuencia de funcionamiento también ha sido variada según la época y la explotación considerada. Esta frecuencia condiciona de manera importante las instalaciones ferroviarias a emplear. Como se ha indicado, la energía eléctrica se genera en corriente alterna trifásica a una frecuencia denominada industrial. De esta manera si el sistema eléctrico ferroviario de corriente alterna funciona a esta frecuencia, su conexión al sistema eléctrico general puede ser directa. Este hecho no se da en otros países del centro de Europa, en los que la red ferroviaria se encuentra alimentada a una frecuencia distinta de la industrial. Precisamente es este valor de frecuencia de la red es el que condiciona la existencia de centrales de energía específicas para alimentar al ferrocarril.

2. Sistema eléctrico de potencia (SEP) ferroviario

Un sistema eléctrico ferroviario es un sistema en el que es posible absorber o generar energía y distribuirla a los trenes de forma eficaz y segura. Por tanto este sistema representa en sí mismo un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) con características propias que hacen adecuado su análisis de forma independiente.

En la mayor parte de los casos el *SEP ferroviario* está interconectado al *SEP general del país* (Figura 1) o, por el contrario, constituye un sistema eléctrico propio. Como es de esperar, en el primer caso los sistemas de C/A ferroviarios funcionarán a la frecuencia industrial mientras que en el segundo lo harán a una frecuencia distinta.

Una característica común es que la energía eléctrica, desde su generación hasta su entrega a los trenes, pasa por diferentes etapas de adaptación, transformación y maniobra.

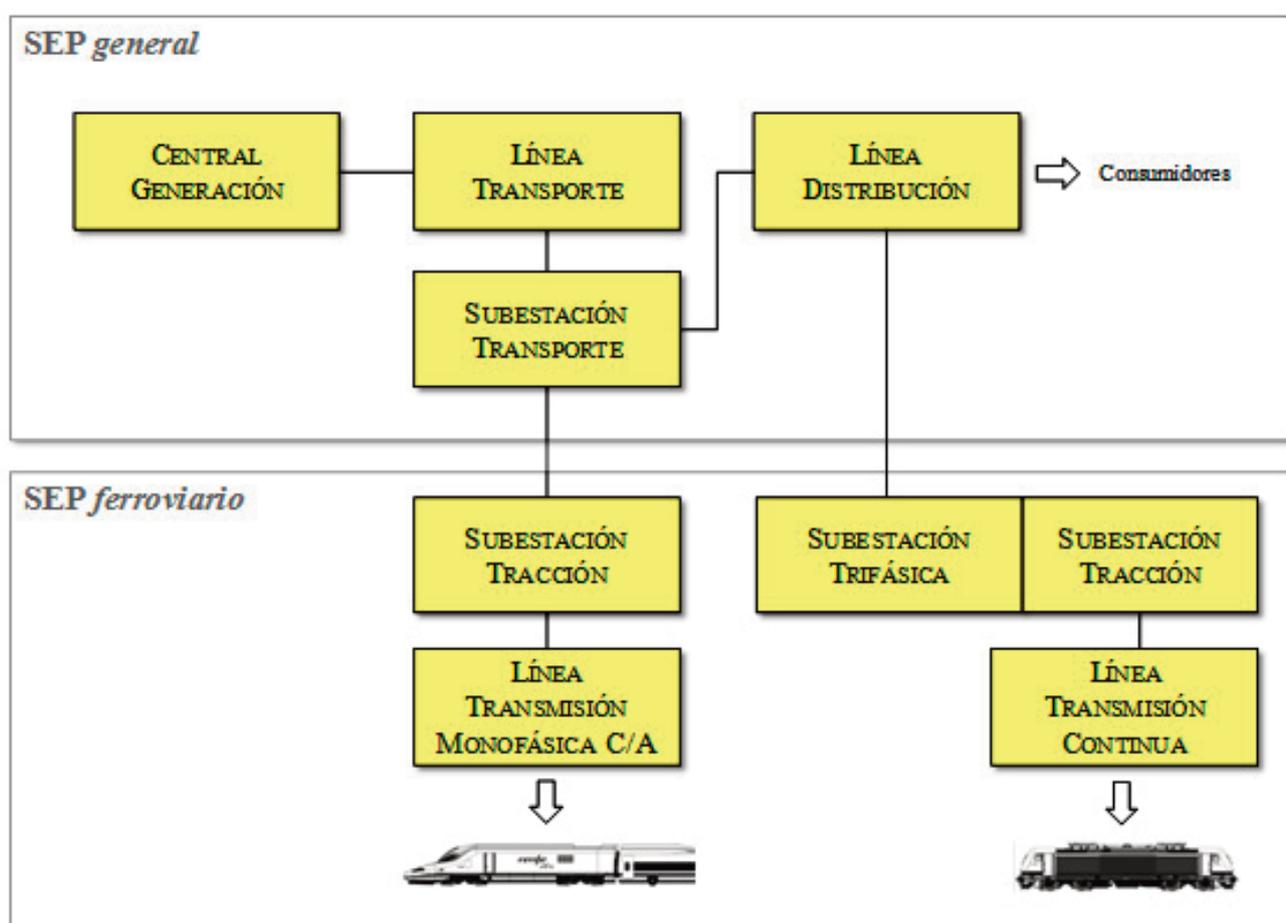


Figura 1. Esquema básico de un Sistema Eléctrico de Potencia 'general' y 'ferroviario'. El SEP ferroviario viene representado por todo el conjunto de elementos necesarios para que pueda funcionar un tren con tracción eléctrica. En el caso más común: 1) Sub-sistema Generación (Central de generación de energía eléctrica trifásica); 2) Sub-sistema Transporte (Subestación eléctrica trifásica de transporte y línea trifásica de transporte); 3) Sub-sistema Distribución (Subestación eléctrica trifásica y línea trifásica de distribución); 4) Sub-sistema Tracción Eléctrica de Alta Velocidad (Subestación de tracción de Alta Velocidad, línea monofásica de transmisión eléctrica al tren (catenaria) y tren); 5) Sub-sistema Tracción Eléctrica Convencional (Subestación de tracción convencional, línea DC de transmisión eléctrica al tren (catenaria) y tren. (Fuente propia).

3. Prospectiva tecnológica en la infraestructura de tracción eléctrica

Si bien es arriesgado afirmar cuáles serán las tecnologías futuras que primarán y se desarrollarán en el campo de la infraestructura para tracción eléctrica ferroviaria, aquí se presenta un análisis basado en los diferentes proyectos tecnológicos que actualmente viene desarrollando diferentes gestores ferroviarios y empresas tecnológicas del sector. El análisis realizado se ha clasificado en tres grupos principales de tecnologías:

- **Mejora de la Eficiencia Energética (E/E) en la tracción.** El consumo de energía eléctrica de tracción sigue representando el mayor coste de explotación de las empresas ferroviarias por lo que se continua (y continuará) investigando y desarrollando tecnología que permita reducir este consumo.
- **Mejora de la integración del SEP ferroviario de C/A con el SEP general.** El SEP ferroviario que funciona con C/A a frecuencia industrial es un sistema perturbador del SEP general como consecuencia de sus características técnicas de funcionamiento¹. La gran expansión que está teniendo este tipo de líneas ferroviarias (casi siempre referidas a líneas de alta velocidad) está produciendo el desarrollo actual y futuro de elementos y componentes de tracción en tierra que permitan reducir las perturbaciones producidas sobre el SEP general.
- **Mejora de la interoperabilidad de los sistemas eléctricos ferroviarios.** La interoperabilidad ferroviaria sigue presentándose como uno de los objetivos actuales y futuros que más importancia tiene en el campo de la electrificación ferroviaria. Si bien se ha establecido un nivel mínimo de armonización técnica, definiendo parámetros interoperables, continúan existiendo casos específicos que por su grado de implantación existente no resultan económicamente rentables modificar, debiendo convivir de manera permanente con el resto de parámetros interoperables. Son estos casos específicos lo que están haciendo desarrollar diferentes modalidades de tecnología que permita operar con esta diferencia de parámetros.

Como se verá a continuación, una característica común a todos los grupos considerados estriba en el empleo de nuevos equipos y sistemas electrónicos de potencia en tierra. Estos equipos, que no han tenido el nivel de penetración en la infraestructura de tierra que sí han tenido en el campo del material rodante, están demostrando su misma efectividad al ser muy versátiles y al hacer uso de tecnologías ya maduras².

4. Tecnología para la mejora de la E/E en la tracción

Junto a la Industria, el sector Transporte se encuentra entre los sectores de actividad que más energía consumen en los países desarrollados. Es por ello que el consumo de energía en este sector es un serio problema social, siendo su crecimiento muy superior al de otros usos. En el caso del sector ferroviario y considerando la energía eléctrica consumida durante 2.012 por el Administrador de Infraestructuras

¹ Se trata de una carga alimentada con corriente alterna monofásica, variable en el espacio y en el tiempo, y de naturaleza muy singular debida, entre otros motivos, a la electrónica de potencia que equipan las locomotoras.

² Cabe no obstante destacar el caso de las compañías ferroviarias japonesas (JR), las cuales son pioneras en el desarrollo e implantación de sistemas electrónicos de potencia en la infraestructura desde hace décadas: La potencia total instalada de estos equipos en el año 2.000 ya rondaba los 1.500 MVA.

Ferrovias (ADIF), se tiene que este consumo fue de aproximadamente 2.800 GWh (aproximadamente el 1,1% del consumo total del país) de los cuales un 84% se destinaron a energía eléctrica de tracción.

Cabe destacar que el incremento de la velocidad de los trenes es uno de los atributos de mayor calidad del servicio que produce mayores consumos específicos pues gran parte de la resistencia al avance crece con el cuadrado de la velocidad. Por otra parte, un mejor servicio al cliente supone siempre, en cada relación de tráfico, una mayor frecuencia de trenes debiendo vencer un mayor número de “veces” la resistencia al avance con el consiguiente aumento del consumo específico de energía. Por último, el uso de los servicios auxiliares (calefacción y aire acondicionado principalmente) también produce importantes aumentos del consumo específico de energía.

Es por ello que un reto actual y futuro de la tracción eléctrica debe ser su mejora continuada en el campo de la Eficiencia Energética. Si bien otros modos están mejorando dicha eficiencia, existe todavía una brecha notable a favor del ferrocarril en comparación con el transporte por carretera y por avión. Aún así, el ferrocarril no debe descuidar en su ventaja competitiva y debe continuar innovando para reducir su consumo energético de tracción. Cabe destacar que los diferentes planes de investigación de un gran número de administradores y compañías ferroviarias tienen como un objetivo común la mejora de la eficiencia energética de sus redes (de nuevo se reseña que el gasto económico destinado a energía de tracción es uno de los costes de explotación más importantes).

Se puede resumir a continuación algunas líneas de trabajo que se están potenciando:

- **Implantación de procedimientos y nuevos componentes para la reducción de pérdidas eléctricas** en los diferentes elementos de la red eléctrica ferroviaria.
- **Implantación de planes de conducción económica.** Este tipo de conducción, definida como aquella que permite obtener el máximo aprovechamiento de la energía de tracción, evita en lo posible la utilización de los frenos pues trata de aprovechar al máximo la marcha en deriva, es decir, la energía cinética y potencial del tren con objeto de recorrer el mayor número de kilómetros sin aplicar la tracción.
- **Implantación de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de la energía eléctrica generada con el freno regenerativo de los trenes.** Respecto a esta línea de trabajo, en el siguiente apartado se describen los tipos principales de estas tecnologías.

No debe olvidarse las actuaciones propias a realizar en el material rodante para mejorar la Eficiencia Energética del sistema en su conjunto. A diferencia de las anteriores, estas actuaciones son puestas en práctica principalmente por los fabricantes y las empresas operadoras de cada tipo de vehículo. De acuerdo a [2] el gran ahorro de energía ya se ha realizado en el caso de los equipos eléctricos embarcados. Concretamente se afirma que los nuevos desarrollos en el material rodante producirán sólo pequeñas mejoras, entre el 1 y el 0,5% de ahorro, por lo que los principales ahorros tienen que venir de nuevos enfoques derivados principalmente de la operación y el diseño de la infraestructura.

Generación de energía eléctrica mediante el uso del freno regenerativo

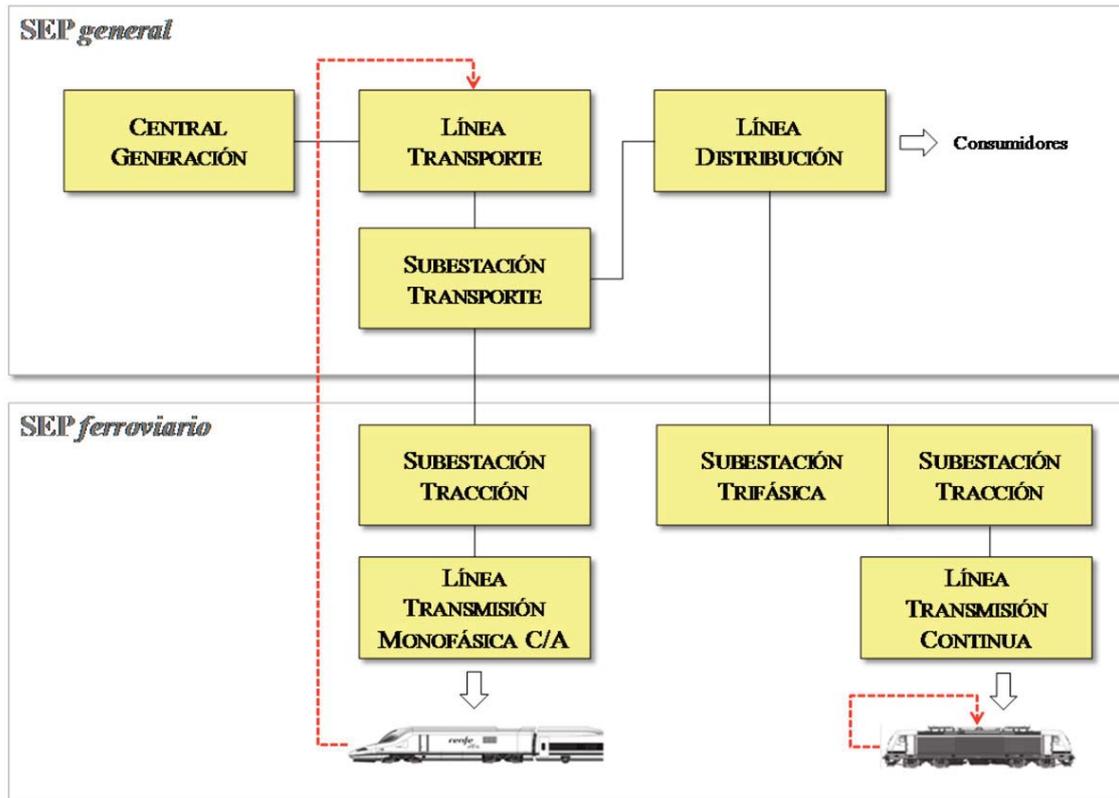
Los trenes de tracción eléctrica producen energía durante el proceso de frenado, convirtiendo su energía cinética o potencial en energía eléctrica. Si bien en algunos casos esta energía generada es disipada en resistencias eléctricas del propio tren, en otras ocasiones es enviada a la línea de transmisión, pudiendo ser utilizada por otro tren que se encuentre acelerando o incluso enviada a la red eléctrica de suministro si no se da este hecho.

El frenado que un tren realiza, entre otros motivos, para detenerse en los puntos de parada prescritos, o para bajar las pendientes existentes en su recorrido, o para cumplimentar las limitaciones de velocidad impuestas, puede tener consecuencias importantes en el cómputo total de la energía eléctrica demandada en una línea ferroviaria.

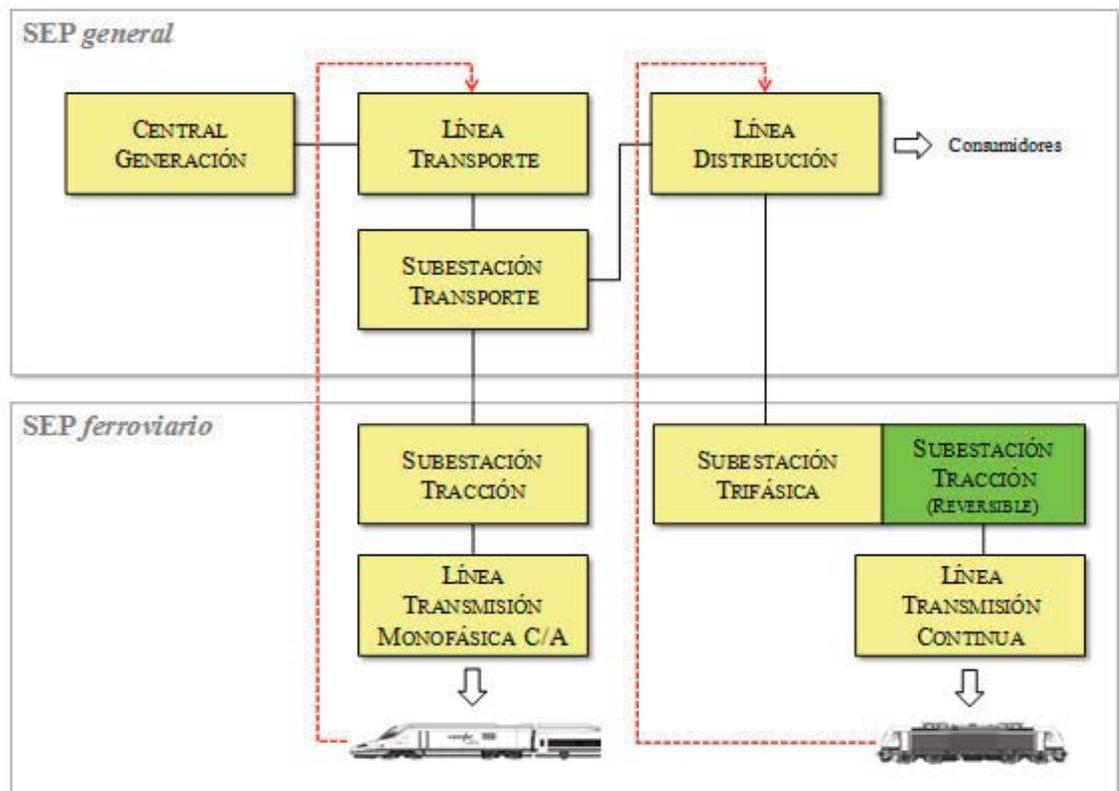
En efecto, de la energía que se disipa en el proceso de frenado, una parte se pierde en los frenos de fricción (frenos de accionamiento neumático), sin ningún aprovechamiento útil, y otra parte es disipada por los frenos dinámicos, que para el caso de los trenes de tracción eléctrica (o de tracción diesel eléctrica), suponen la generación de energía eléctrica.

En la actualidad la energía eléctrica que se genera en este tipo de freno puede tener varios destinos:

- Si el tren no tiene freno regenerativo, la energía es disipada en forma de energía calorífica en resistencias eléctricas embarcadas en el propio tren (frenado reostático).
- Si el tren sí tiene freno regenerativo, la energía es devuelta a la línea de transmisión. En este caso, si hay otro tren que se alimenta desde el mismo sector eléctrico y que demanda energía, la consume, constituyendo un proceso óptimo desde un punto de vista energético. Si no existe un tren demandando energía, se presentan tres casos adicionales:
 - o Si se trata de una electrificación en C/A, la energía generada es devuelta a la red eléctrica de suministro, pudiendo ser utilizada por otros consumidores conectados a ella (Figura 2A).
 - o Si se trata de una electrificación en C/C con un grupo rectificador en la subestación, la energía es disipada en las resistencias del freno reostático que lleva instalado el tren (Figura 2A).
 - o Si se trata de una electrificación en C/C con un grupo rectificador en la subestación y un inversor en paralelo (subestación *reversible*), la energía generada es devuelta a la red eléctrica de suministro, pudiendo ser utilizada por otros consumidores conectados a ella (Figura 2B).



A)



B)

Figura 2. Diagrama de flujo de la energía eléctrica generada. (Fuente propia).

Cabe destacar que entre 2.007 y 2.009 un grupo de empresas e instituciones españolas³ desarrollaron el proyecto de investigación *Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables* (proyecto *ELECRAIL*). En dicho proyecto se estimó que para un año tipo, los trenes que circulan por las redes ferroviarias españolas disipan anualmente en el freno unos 1.200 GWh de energía. De esta cantidad de energía, sólo se aprovecha en la actualidad algo menos del 50%. El resto se pierde: O bien porque algunos trenes no tienen freno regenerativo, o bien por la imposibilidad de devolver energía eléctrica desde de la red ferroviaria convencional a la red eléctrica general.

4.1. Tecnologías para el aprovechamiento de la energía del freno regenerativo

El aprovechamiento interno de la energía regenerada por los trenes debe afrontarse mediante la incorporación en la infraestructura de tecnologías muy diversas por lo que la I+D cobra una especial relevancia en este proceso.

Reaprovechamiento de la energía de frenado a través de una configuración y/u operación óptima de la red en líneas de C/C y C/A

El objetivo es propiciar la situación en la cual un tren frena y otro acelera de manera que éste último consuma la energía eléctrica regenerada por el primero. Para propiciar que este hecho se produzca de forma frecuente, se pueden realizar distintas acciones; Así por ejemplo se podría configurar el circuito eléctrico de tracción permitiendo secciones más largas y por tanto con mayor densidad de trenes en ellas. También se podría implantar una malla de explotación en la que se sincronicen los procesos de aceleración y frenado de los trenes en una misma estación.

En la actualidad son las líneas con alta densidad de tráfico – normalmente líneas metropolitanas y de cercanías – en las que suele producirse esta situación. Ello es debido al alto número de paradas que los trenes realizan en estas explotaciones, lo que implica frecuentes procesos de aceleración y frenado. Se ha estimado que se está llegando a recuperar entre el 15 y el 30% de la energía consumida.

Como es de esperar, en las líneas de alta velocidad (con C/A) la situación en la cual un tren frena y otro acelera es menos probable si se compara con las líneas ferroviarias anteriores. Y es que además de existir por lo general una menor densidad de tráfico, también hay que considerar la existencia de zonas neutras de separación de fases eléctricas en la línea de transmisión. Lógicamente la existencia de un mayor número de estas zonas puede implicar que los sectores eléctricos sean más cortos por lo que se hace menos probable que varios trenes coexistan en un mismo sector y que por tanto se puedan dar procesos de reaprovechamiento energético internos.

Inversión de corriente en líneas de C/C

Según se ha indicado anteriormente, mientras que en las electrificaciones de C/A monofásica la devolución de energía a la red de suministro es algo que se hace por las propias características técnicas del sistema, no ocurre lo mismo en las electrificaciones de corriente continua. En este caso la existencia de rectificadores de diodos impide la circulación de corriente hacia la red exterior.

³ Consultar Tabla II del presente artículo.

Si bien la tecnología ha estado disponible todos estos años para poder permitir la circulación de esta corriente desde la subestación de C/C a la red de distribución, normalmente mediante la incorporación de un inversor de corriente en paralelo con el grupo transformador/rectificador (Figura 3A), no ha existido un marco legal y sobre todo económico, que incentivara el proceso por parte de los gestores y empresas ferroviarias. En esta situación sólo se beneficia el SEP general, pues recibe grandes cantidades de energía procedente de las redes ferroviarias sin que éstas reciban ninguna compensación económica. La creación de este marco (en España regulado por el Real Decreto 1011/2009) ha permitido que la instalación de inversores de potencia sea cada vez mayor, posicionándose como una de las soluciones más rentables para las empresas ferroviarias.

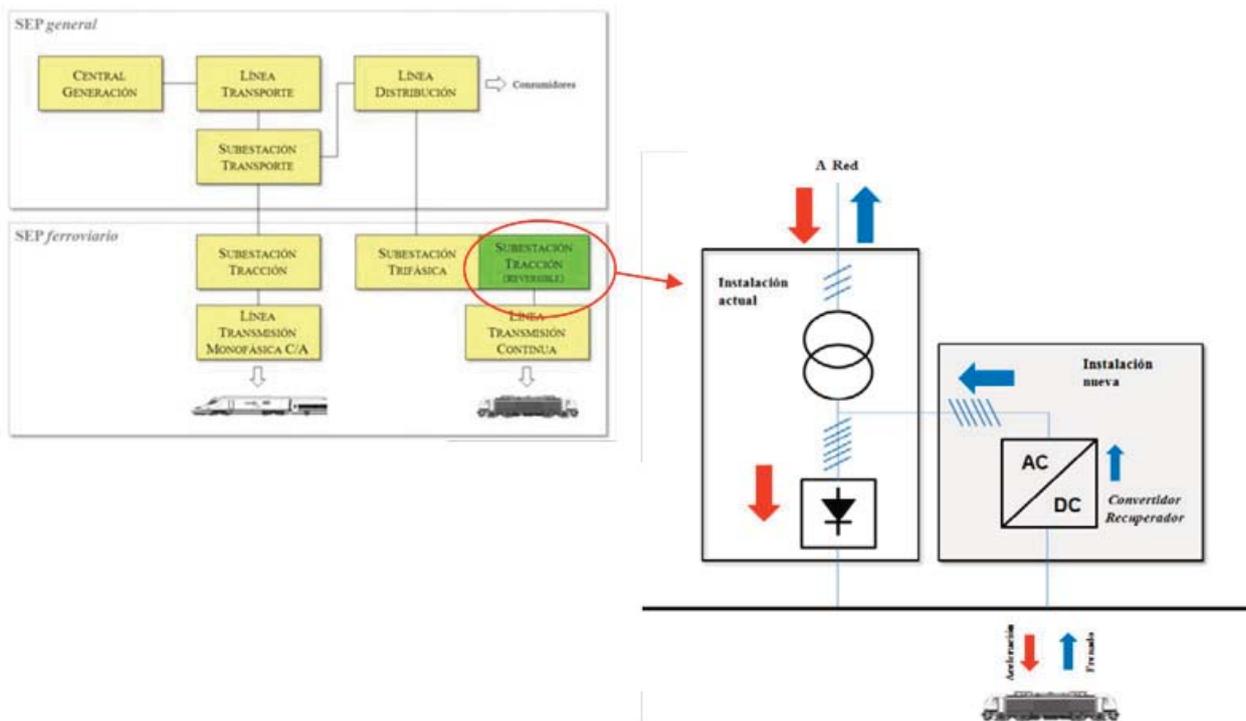
Almacenamiento de energía en tierra en líneas de C/C

El principio de funcionamiento consiste en almacenar la energía regenerada en plantas de almacenamiento situadas en tierra. Estas plantas, que se pueden situar en la propia subestación de tracción o a lo largo de la línea, suministrarían la energía almacenada cuando los trenes volvieran a demandarla (Figura 3B).

Si bien las tecnologías actuales de almacenamiento son muy variadas, la mayor parte de los proyectos ferroviarios en este campo están empleando baterías, supercondensadores y/o volantes de inercia, siempre conectados a un convertidor de potencia conectado a su vez con la línea de transmisión.

Trasvase de corriente entre líneas de C/C y C/A

La expansión continuada de las líneas de alta velocidad (C/A) plantea la posibilidad de conectar desde ellas las líneas de C/C, en aquellos puntos en los que ambos tipos de redes coexisten. Para ello se instalaría un convertidor electrónico de alta potencia que permita trasvasar la energía regenerada en la línea de alta velocidad a la línea de C/C y viceversa.



A)

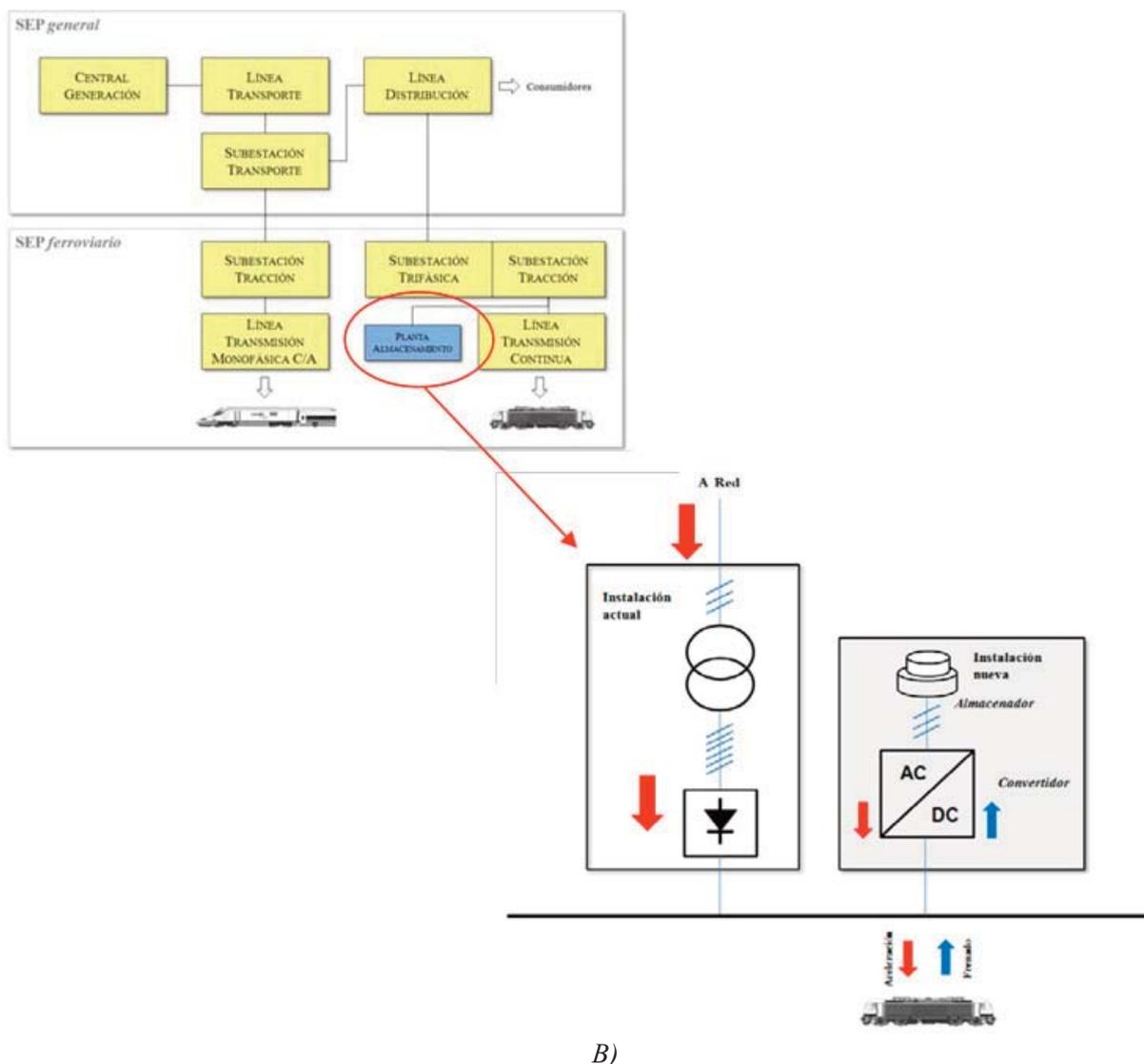


Figura. 3. A) Esquema de inversión de corriente. B) Esquema de almacenamiento de energía en tierra. (Fuente propia).

4.2. La Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente (REFI)

Los administradores ferroviarios se están planteando cuál podría ser el escenario eléctrico ferroviario considerando la adopción de las pautas establecidas por las redes inteligentes. En todos los casos estas pautas permitirían realizar una gestión óptima de la energía de tracción en el SEP ferroviario con el consiguiente ahorro energético.

Una red eléctrica convencional se basa en sistemas de comunicación unidireccionales que proporcionan energía desde las grandes plantas de generación centralizada hasta los centros de consumo, sin intercambio de información. Es una red en la que se generan fallos de manera constante, que ha de funcionar de forma perfecta durante casi todo el tiempo –o los problemas pueden acumularse en forma de cascada– y en la que se pierde mucha energía en la transmisión.

Una red inteligente propone, para ello, una comunicación de doble sentido entre los generadores y los usuarios, de forma que los aparatos y elementos a alimentar sean utilizados únicamente cuando la energía

esté disponible y resulte más barata. Esto permitiría a los proveedores de electricidad un mayor control sobre el estado del sistema, los posibles fallos y la calidad o cantidad de energía disponible en la red en cada momento. Las redes inteligentes suponen, además, un sistema eléctrico donde la micro generación, aquella que se genera cerca del ámbito donde va a ser consumida, juegue un papel mucho más importante.

Un aspecto fundamental que debe considerarse en una *Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente (REFI)*, estriba en controlar de manera óptima el uso de la energía regenerada de los trenes en el supuesto de la existencia de todos los dispositivos que permiten aprovecharla: Plantas de almacenamiento en tierra, interconexión de redes ferroviarias y subestaciones reversibles.

Si se considera que el SEP general envía señales de eficiencia a través del precio, se trataría de optimizar el coste de la energía, ya que la eficiencia no se consigue sólo reduciendo el consumo de energía, sino reduciendo la importación de la red pública en los momentos en los que la producción de energía es más ineficiente (lo que se refleja en su mayor precio). Por ello, según la situación instantánea del mercado eléctrico, podrá ser más interesante almacenar energía, devolverla a la red, producir parte de la electricidad dentro del sistema, circular en deriva, etcétera.

Adicionalmente una REFI debe plantear la integración del SEP ferroviario con los sistemas ATP y con las herramientas de planificación y control de itinerarios de manera que los trenes puedan ser controlados en función de su energía consumida. Así, un tren que fuera adelantado en su horario podría tener restringido el consumo de energía de tracción en ciertos casos mientras que en la situación contraria no debería tener restricciones. Respecto a los sistemas ATP, y con la excepción importante de ciertas explotaciones ferroviarias interurbanas, actualmente el sistema ERTMS no cuenta actualmente con una especificación que permita la conducción eficiente del vehículo desde un punto de vista energético. Una REFI debe permitir alcanzar este objetivo, integrando de manera inteligente las acciones de los trenes que se encuentran conectados a ella con el fin de conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible.

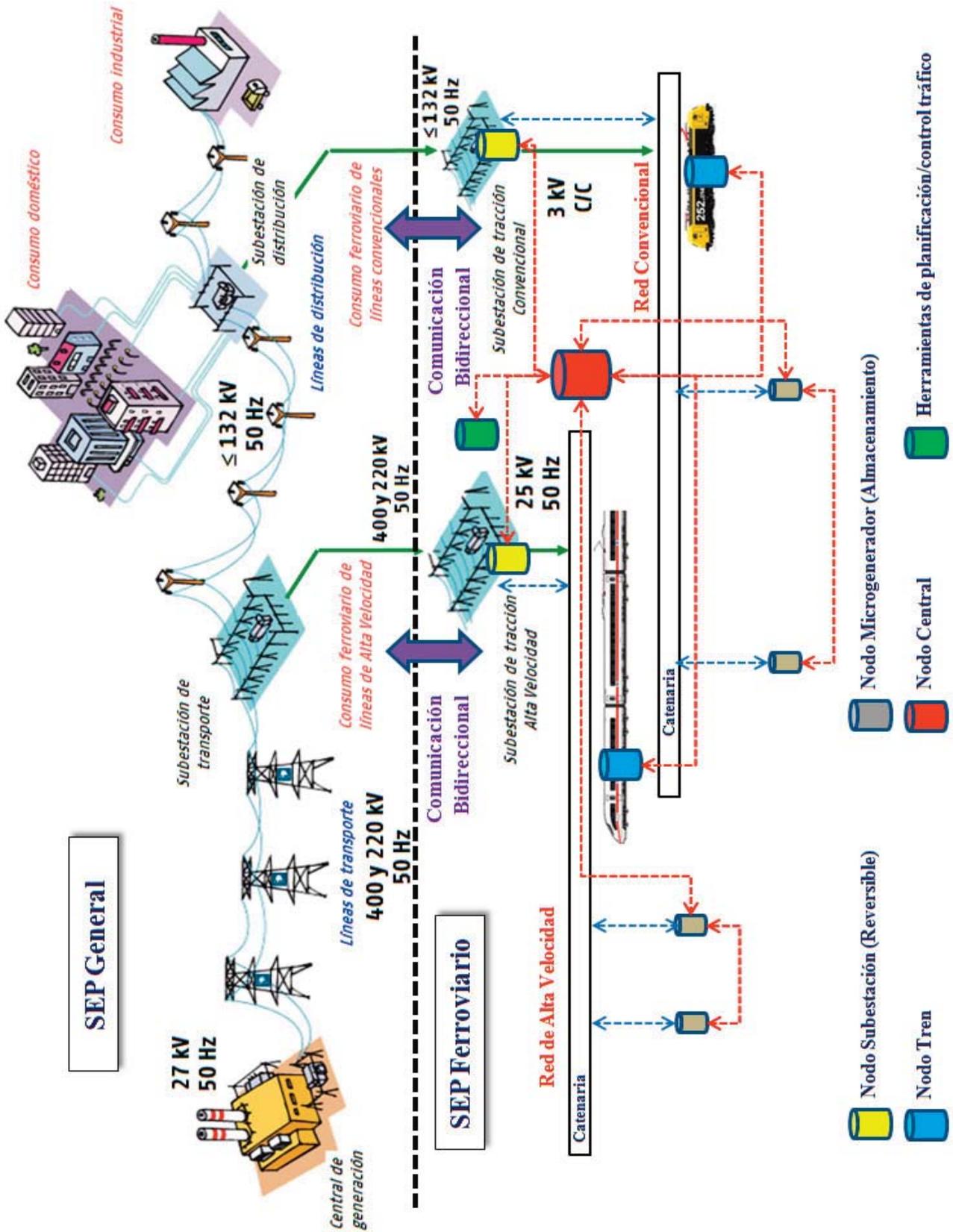


Figura 4. Posible esquema general de REFI. (Fuente propia, con ilustraciones de Red Eléctrica de España (REE)).

4.3. Estrategia tecnológica para la mejora de la E/E en la tracción: Comparativa y síntesis general de las diferentes tecnologías

Es de esperar que la implantación de nuevos componentes que permitan mejorar las pérdidas eléctricas en la red sea una acción que debe considerarse en la fase de diseño y montaje del SEP ferroviario ya sea nuevo o renovado.

Con respecto al aprovechamiento de la energía de frenado, el reaprovechamiento entre trenes a través de la *configuración y operación óptima de la red* es, a priori, la primera solución que podría ser adoptada por parte de los administradores y compañías ferroviarias pues normalmente no suele llevar asociada la ejecución de planes presupuestarios de una cuantía elevada. Todo este paquete de medidas debería ser aplicado indistintamente en líneas de C/C y C/A.

Continuando con el aprovechamiento de la energía de frenado, y aun considerando la puesta en práctica de una configuración y operación óptima de la red, puede afirmarse que siempre existirá energía de frenado susceptible de ser reaprovechada por alguna de las otras tecnologías analizadas. Su implantación, sólo para el caso de líneas de C/C, sí conllevará una inversión económica derivada de la adquisición de los equipos correspondientes, debiendo ir precedida de los correspondientes estudios económicos de amortización. En este capítulo cobra especial importancia la posible remuneración económica que la empresa ferroviaria obtendría por devolver a la red general la energía de frenado no aprovechada, por lo que la tecnología de *inversión de corriente* tiene actualmente un interés creciente por parte de los agentes ferroviarios.

Cabe destacar que, a diferencia de esta tecnología, el *almacenamiento de energía* tiene otra serie de ventajas sobre la red ferroviaria, además del propio ahorro energético producido. En efecto, la incorporación de plantas de almacenamiento en la infraestructura de tierra puede suponer la mejora del flujo de potencia en la red, principalmente representado por el incremento de la tensión de servicio en la línea de transmisión, lo que lleva asociado a su vez menores desconexiones de las protecciones de mínima tensión de la subestación, mejora del funcionamiento de los motores eléctricos de los trenes, etcétera. De esta manera, si no se tuvieran problemas eléctricos de esta naturaleza, la tecnología de inversión de corriente sería a priori más interesante en el momento actual, pues también debe considerarse un menor coste de mantenimiento derivado del menor número de equipos que se precisan en la instalación.

Al igual que se indicaba con las medidas de configuración y operación óptima de la red para posibilitar el reaprovechamiento de energía entre trenes, la implantación de planes de conducción económica tampoco suelen ir asociados con grandes inversiones (al menos aquellos que se ejecutan de manera manual) por lo que también sería deseable su aplicación en todo tipo de líneas y explotaciones. La integración de este tipo de conducción con los sistemas ATP y ATO sería la solución técnica más apropiada, en cuyo caso sí será necesario realizar actuaciones en estos sistemas con los consiguientes costes asociados.

La Tabla I resume de manera general la situación anteriormente expuesta.

	Aplicación	Criterios y observaciones Técnicas	Criterios y observaciones Económicas
Implantación de procedimientos y nuevos componentes para la reducción de pérdidas eléctricas.	Línea D/C. Línea A/C.	Medida especialmente adecuada introducirla durante la fase de diseño/adequación del SEP ferroviario.	No se plantea una inversión especialmente destacable. Durante la fase de diseño puede no representar ningún coste.
Planes de conducción eficiente.	Línea D/C. Línea A/C.	Importante reducción del consumo energético.	No se plantea una inversión especialmente destacable. Incluso de ser adoptada de manera manual, su coste es ínfimo
Aprovechamiento de la energía de frenado. <i>Aprovechamiento por otros trenes (configuración y operación eficiente).</i>	 <i>Línea D/C. Línea A/C.</i>	 <i>Proceso óptimo desde el punto de vista energético. Aprovechamientos entre el 20 y el 30% de la energía consumida.</i>	 <i>No se plantean inversiones destacables. La idea es optimizar la red existente.</i>
<i>Devolución a la red eléctrica externa.</i>	<i>Línea D/C. Línea A/C.</i>	<i>En redes A/C la devolución es inmediata. En redes D/C debe considerarse si la energía es regularizada por la compañía eléctrica a favor de la compañía ferroviaria.</i>	<i>Adquisición e instalación de convertidores para recuperación de la energía.</i>
<i>Devolución a otra red eléctrica ferroviaria (AC-DC).</i>	<i>Línea D/C. Línea A/C.</i>	<i>Proceso técnicamente factible si bien precisa actualmente de más estudios.</i>	<i>Adquisición e instalación de convertidores para trasvase de la energía.</i>
<i>Almacenamiento.</i>	<i>Línea D/C.</i>	<i>Desde un punto de vista de ahorro energético puede ser menos interesante que la devolución a la red externa (en caso de ser considerada la energía). Tiene otras ventajas relacionadas con la mejora de los flujos y calidad de la energía.</i>	<i>Adquisición e instalación de convertidores y almacenadores de energía.</i>
Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente.	Línea D/C. Línea A/C.	Plantea integrar todas las tecnologías existentes y controlar en todo momento la reducción del consumo aplicando las pautas más adecuadas.	Actualmente plantea un análisis económico en detalle.

Tabla I. Comparativa y síntesis general de las diferentes tecnologías. (Fuente propia).

5. Apuntes generales sobre iniciativas tecnológicas destacables

Según se indicó, ya que el consumo de energía eléctrica de tracción representa en la actualidad uno de los mayores costes de explotación de las empresas ferroviarias, son numerosas las iniciativas tecnológicas puestas en marcha por administradores y compañías ferroviarias en colaboración con la industria, universidad y centros tecnológicos.

A tal respecto en la Tabla II se recoge una serie de ellas, tanto a nivel nacional como internacional, indicando sus principales objetivos así como información adicional variada.

Dentro del nuevo programa de investigación europeo Horizonte 2020, la Comisión Europea ha previsto que la actividad de I+D del sector ferroviario se regule mediante una fórmula de colaboración JU (*Joint Undertaking*) bajo el acrónimo *SHIFT²RAIL*. Dicha iniciativa, fundada por varias empresas y administradores ferroviarios, tiene por objetivo apoyar la competitividad de la industria europea en un sector amenazado por la competencia internacional, especialmente la industria asiática.

La importancia de *SHIFT²RAIL* estriba en que bajo su paraguas se desarrollará durante el próximo lustro todos los nuevos programas de I+D asociados a la Eficiencia Energética del ferrocarril. Cabe destacar que este aspecto es prioritario en esta nueva iniciativa tecnológica, lo cual vuelve a demostrar la importancia de este tema en el sector.

De manera más detallada, puede afirmarse que *SHIFT²RAIL* continuará potenciando y desarrollando la tecnología de red eléctrica inteligente, así como la optimización de equipos destinados a las diferentes acciones vistas anteriormente (nuevos convertidores electrónicos, más compactos y optimizados; nuevos equipos de almacenamiento, etc.).

Actuación	Ámbito	Programa I+D	Estado	Objetivos principales y promotores-socios
ELECRAIL.	Nacional.	Fomento-Cedex 2007.	Finalizado.	Analizar de forma sistemática el consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables. <i>Participantes: Fundación de los Ferrocarriles Españoles; IIT de la Universidad Pontificia Comillas (ICAJ); Facultad de CC. Matemáticas de la Universidad Complutense de Madrid; Adif; Renfe-Operadora; FGC; Metro de Madrid; TMB; Dren; Patentes Talgo; CAF; Dimetronic; IngeTeam; y M. Torres.</i>
RAIL ENERGY.	Europeo.	VI Programa Marco.	Finalizado.	Reducir el consumo de energía mediante el desarrollo de un enfoque holístico marco, nuevos conceptos y soluciones técnicas y tecnológicas integradas para mejorar la eficiencia energética. <i>Participantes: Varios (ninguno español).</i>
ACE ² .	Nacional.	PROFIT.	Finalizado.	Desarrollar una planta de almacenamiento de energía de frenado basada en tecnología de volantes de inercia. <i>Participantes: Adif y Ciemat.</i>
SA ³ VE.	Nacional.	PSE 2006.	Finalizado.	Mejorar el desarrollo anterior mediante la optimización del volante de inercia y los equipos de potencia. <i>Participantes: ACCIONA Infraestructuras, Adif, CEDEX, Ciemat, ELYTT Energy, Green Power, Iberdrola, Metro Madrid, TECNKER, Universidad de Sevilla y Zigor.</i>
INVERFER.	Nacional.	-	Finalizado.	Desarrollar un primer prototipo de subestación eléctrica D/C reversible de 3.000 V. Este prototipo se encuentra instalado en la línea de Cercanías Málaga-Fuengirola. <i>Participantes: Adif, Isolux e IngeTeam.</i>
FerroSmartGrid.	Nacional.	ININTERCONECTA 2011.	En ejecución.	Desarrollar un primer prototipo de ámbito local de REFI, sobre una línea ferroviaria en funcionamiento. <i>Participantes: Adif, Telvent, Schneider Electric, Acisa, Inabensa, Win Inertia, Andel, Adevice e Indra.</i>
MERLIN.	Europeo.	VII Programa Marco.	En ejecución.	Desarrollar la funcionalidad y estándar de una REFI. El valor añadido del proyecto es que interactúan gran número de empresas europeas, lo que permite enriquecer los resultados al disponer y considerar la manera de operar en distintos países. <i>Participantes: Varios (CAF, Adif, Renfe y Fundación de los Ferrocarriles Españoles en el caso español).</i>
SHIFT ² RAIL.	Europeo.	Horizonte 2020.	Previsto.	Nuevo programa de I+D Europeo en el ámbito ferroviario. En el caso del área de Eficiencia Energética, el programa tiene previsto desarrollar una serie de medidas muy ambiciosas con auténticos demostradores en campo: Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente, Nuevos equipos de potencia para aplicación en subestaciones reversibles (D/C) y sistemas de almacenamiento.

Tabla II. Iniciativas tecnológicas destacables en materia de E/E para tracción. (Fuente propia).

Bibliografía

- [1] **Operación de trenes de viajeros. Claves para la gestión avanzada del ferrocarril.** *Alberto Cillero Hernández, Alberto García Álvarez y Pilar Jericó Rodríguez.* Fundación de los Ferrocarriles Españoles (Colección Técnica). 2.011.
- [2] **Los cambios en el sector energético impulsarán la transformación de la tracción ferroviaria (traducido).** *Roger Kemps.* Artículo publicado en Railway Gazette. 2.008.
- [3] **Tecnologías específicas de electrificación en ferrocarriles de Alta Velocidad.** *José Conrado Martínez Acevedo.* Documentación de Microcurso del mismo nombre. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. 2.012.
- [4] **Devolución de energía eléctrica desde el sistema ferroviario a la red de suministro y reaprovechamiento previo.** *José Conrado Martínez Acevedo, Antonio Berrios Villalba, Jorge Iglesias Díaz y Carlos Tobajas Guerra.* Artículo publicado en el II Seminario sobre estrategias de ahorro y eficiencia energética en el transporte ferroviario. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Sitges. 2.008.
- [5] **Informe de proyecto de investigación ELECRAIL.** 2.011.
- [6] **AC Power Supply system for railways in Japan.** *Tetsuo UZUKA y Dr. Hiroki NAGASAWA.* Railway Technical Research Institute. 2.009.
- [7] **Análisis de las perturbaciones producidas por el sistema eléctrico de potencia de ferrocarriles de alta velocidad alimentados a frecuencia industrial.** *José Conrado Martínez Acevedo.* Artículo publicado en 2.014 en Vía Libre Investigación Ferroviaria.
- [8] **Informe de Red Eléctrica de España (REE) en 2.012.** REE. 2.012.

Aplicación de la metodología RCM al mantenimiento de los motores de agujas en Metro LigerO Oeste

Application of the RCM methodology to the maintenance of the point machines in the West Light Rail Lines

Juan Ignacio Romero*

Director de Operación y Recursos Humanos en Metro LigerO Oeste

Óscar Díez Bayón*

Gerente de Ingeniería y Mantenimiento

Resumen

En el proyecto “Aplicación de la metodología RCM al mantenimiento de los motores de agujas en Metro LigerO Oeste”, la metodología RCM se ha aplicado sobre un motor de agujas genérico, en el que mediante un AMFE (Análisis de los Modos de Fallo y de sus Efectos) se han analizado los modos de fallo, sus causas y efectos para establecer una criticidad y, posteriormente, determinar las causas y plantear posibles acciones de mantenimiento a acometer. El mayor logro del proyecto ha sido llevar a cabo el diseño y aplicación de un proceso de análisis RCM a los motores de aguja del Metro LigerO Oeste, obteniéndose un nuevo programa de mantenimiento preventivo que permite adecuar las tareas y frecuencias aplicables según el entorno operativo específico de cada uno de los dispositivos considerados.

Palabras clave: Motores de agujas, RCM, mantenimiento, Metro LigerO, Metro LigerO Oeste, MLO.

Abstract

In the project Application of the RCM methodology to the maintenance of the point machines in the West Light Rail Lines system, the RCM methodology was applied to a generic, universal point machine. The failure modes, causes and effects of the failures were analyzed by applying an FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), in order to establish levels of critical importance and later to determine the causes and propose possible maintenance actions to be carried out. The project's greatest achievement has been the preparation and application of an RCM analysis process to the West Light Rail Lines's point machines, creating a new preventive maintenance program that adjusts the tasks and applicable frequencies according to the specific operating environment of each of the devices included.

keywords: Point machines, RCM, maintenance, Light Rail.

* juanignacio.romero@metroligero-oeste.es, oscar.diezbayon@gmail.com

En todo sistema de transporte la prestación de servicio de manera regular y segura tiene una importancia fundamental. Para su consecución, los motores de agujas adquieren una especial relevancia dado que es el sistema que permite el desplazamiento del vehículo de una vía a otra. El proyecto ha consistido en establecer una metodología, práctica y sencilla, de mantenimiento y gestión a los motores de agujas de la explotación de Metro LigerO Oeste, incrementando la eficiencia de la explotación mediante la optimización del plan de mantenimiento preventivo vigente para dichos motores de agujas.

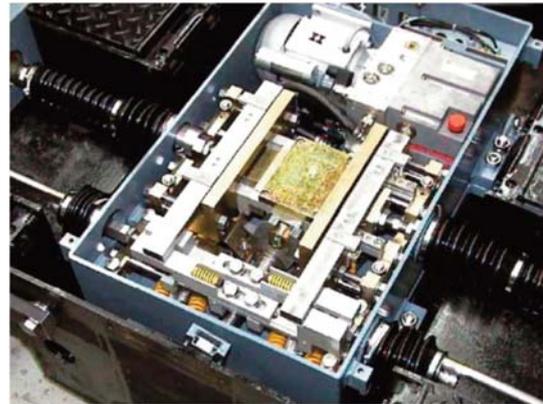


Figura 1. Motor de agujas

Para ello, se ha considerado la metodología RCM (Reliability Centered Maintenance), “Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad”, como la más apropiada para lograr tal fin, ya que sus principios conceptuales se adaptan perfectamente a la resolución de la problemática introducida por el sistema considerado, a saber: gran número de dispositivos iguales en entornos operativos distintos.

El objetivo principal del RCM es establecer el mantenimiento adecuado para conseguir el máximo beneficio en la explotación de un determinado dispositivo, centrándose en conservar la funcionalidad del sistema y teniendo en cuenta las especificidades de la instalación y su entorno operativo. Es una metodología de análisis sistemático, objetivo y documentado, aplicable a cualquier tipo de instalación industrial y muy adecuada para la implantación u optimización de un plan de mantenimiento preventivo que contribuye a la mejora de la confiabilidad de la misma y, por consiguiente, al incremento de la rentabilidad de los activos físicos implicados.

La dificultad y, a su vez, parte más creativa del trabajo realizado ha sido aplicar la metodología RCM de forma eficiente, siendo rigurosos en la aplicación de sus principios pero planteando un proceso de análisis que permitiera su desarrollo en un período de tiempo viable, dada la imposibilidad de efectuar un análisis RCM clásico a cada motor de agujas por el gran número de dispositivos de este tipo presentes en la instalación (83 motores), lo que hubiese supuesto el análisis de 7.387 modos de fallo (89 modos fallo en cada motor).

El proceso general de la metodología RCM conlleva una serie de tareas: definir claramente el sistema objeto del proyecto, sus interfaces con otros sistemas de la instalación y los componentes que lo forman, para posteriormente realizar el análisis de criticidad, permitiendo la selección de tareas de mantenimiento, la implantación de recomendaciones y el seguimiento de resultados. A la metodología general del RCM se ha añadido la determinación de las “tipologías de motores de agujas” lo que ha permitido, mediante la variación de la frecuencia de las tareas de mantenimiento propuestas para un motor genérico, adecuarlas a las particularidades de cada motor de agujas según su ubicación y entorno operativo.

La metodología RCM se ha aplicado sobre un motor de agujas genérico, en el que mediante un AMFE (Análisis de los Modos de Fallo y de sus Efectos) se han analizado los modos de fallo, causas y efectos de los fallos, para establecer una criticidad y posteriormente determinar las causas y plantear posibles acciones de mantenimiento a llevar a cabo.

La solución propuesta permite, tras la identificación de los mecanismos de fallo del dispositivo genérico “motor de agujas”, el establecimiento de distintas tipologías de motores según su impacto funcional sobre la explotación y la selección de tareas de mantenimiento apropiadas, adecuando sus frecuencias y contenidos a la criticidad o importancia de cada motor de agujas en particular. El resultado del proyecto se materializa en la formulación de un plan de mantenimiento preventivo eficiente y adecuado a su entorno operativo para los motores de agujas, y en la elaboración de un cuadro de mando basado en indicadores que permita su evaluación y seguimiento, así como la adaptación de dicho plan a las futuras necesidades y circunstancias en base a los resultados que se obtengan.



Figura 2. Etapas del análisis RCM

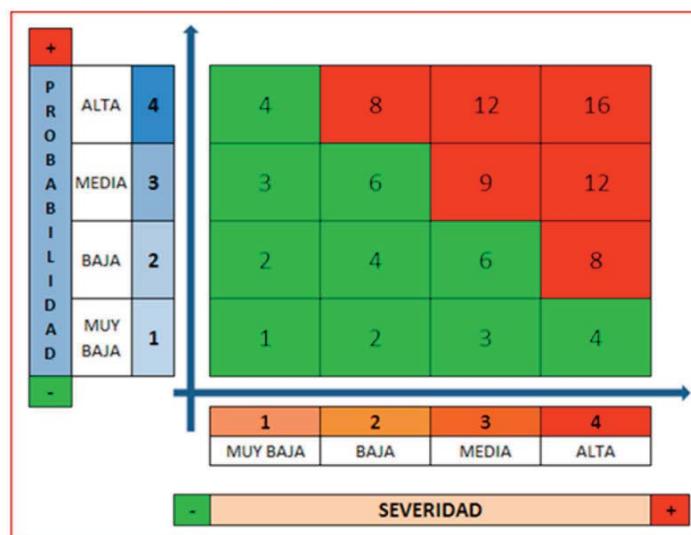
1. Cálculo de la criticidad: componentes y modos de fallo críticos

El proceso de evaluación de criticidad determina qué componentes son críticos para llevar a cabo la funcionalidad del sistema en su conjunto. Se han establecido una serie de criterios comunes que resumen el impacto que tiene el fallo de cada uno de los componentes en la pérdida de la funcionalidad del motor de agujas. Los aspectos tomados en cuenta para calcular la criticidad son los siguientes:

- **Impacto en la operación.** Pérdida de control sobre el motor de agujas (mando local, remoto o falta de comprobación).
- **Impacto en la seguridad.** Afección a la seguridad.
- **Detectabilidad.** Tiempo que abarca desde que sucede el fallo del componente hasta que éste es detectado.
- **Coste del mantenimiento correctivo.** Coste de la reparación, hasta la recuperación de la funcionalidad.
- **Tiempo de reparación.** Tiempo de resolución, desde la detección hasta la recuperación de la funcionalidad.

La determinación de los criterios y asignación de valores se ha realizado conjuntamente con el responsable del puesto de mando, conocedor del impacto en la operación, y técnicos de mantenimiento de instalaciones fijas, capaces de determinar la afección a la seguridad, la detectabilidad y los tiempos de reparación.

Una vez calculados los cinco factores ponderamos según se ha estimado en importancia, obteniendo un valor de criticidad para cada modo de fallo de cada componente. La criticidad total de cada uno de los componentes se calcula como el producto de la probabilidad de ocurrencia de fallo multiplicado por el daño ocasionado (o severidad), obteniendo la “matriz de riesgo o criticidad”.



En la figura 4 se puede ver el detalle del análisis de criticidad para varios componentes del motor de agujas:

ID Componente	ID Modo de fallo	Coste de mant. correct (0-3)		10%		Tiempo de reparación (0-3)		10%		Impacto en la operación (funciones)				Impacto Operación [F1-F2-F4] (0-3)		Impacto seguridad [F3-F5-F6] (0-3)		Detectabilidad (0-3)		100%		P Probabilidad (1-4)	P x D Criticidad	>
		0-baja 1-medio 2-medio 3-alto		Ponderación	0-bajo 1-medio 2-alto 3-muy alto		Ponderación	Mando remoto (F1)	Mando manual (F2)	Comprobación (F4)	Total	Ponderación	0-nulo 1-bajo 2-medio 3-alto		Ponderación	0-alta 1-media 2-baja 3-nula		Ponderación	D VALOR DAÑO (1-4)					
		1 (no)	0 (si)		1 (no)	0 (si)		1 (no)	0 (si)	0	1		2	3		1.muy baja	2.baja			3.media	4.alta			
C01	MF01	2	0.2	1	0.1	0	0	1	0.4	1.2	0.36	2	0.6	0	0	2.26	3	6.78	NC					
	MF02	0	0	1	0.1	0	0	1	0.4	1.2	0.36	2	0.6	0	2.06	3	6.18	NC						
C02	MF03	1	0.1	1	0.1	0	0	1	0.4	1.2	0.36	2	0.6	1	2.36	3	7.08	C						
	MF04	1	0.1	1	0.1	1	0	1	0.7	2.1	0.63	2	0.6	0	2.43	2	4.86	NC						
	MF05	0	0	1	0.1	1	0	1	0.7	2.1	0.63	2	0.6	0	2.33	3	6.99	C						
C04	MF06	2	0.2	2	0.2	0	1	0	0.3	0.9	0.27	0	0	3	0.6	2.27	2	4.54	NC					
	MF07	0	0	1	0.1	0	0	0	0	0	0	2	0.6	2	0.4	2.1	3	6.3	NC					
	MF08	1	0.1	2	0.2	0	0	0	0	0	0	2	0.6	2	0.4	2.3	3	6.9	NC					
	MF09	1	0.1	2	0.2	0	0	0	0	0	0	2	0.6	2	0.4	2.3	3	6.9	NC					
C06	MF10	2	0.2	2	0.2	0	0	1	0.4	1.2	0.36	2	0.6	0	2.36	1	2.36	NC						
C07	MF11	2	0.2	1	0.1	0	0	1	0.4	1.2	0.36	1	0.3	1	0.2	2.16	2	4.32	NC					
	MF12	2	0.2	2	0.2	0	0	1	0.4	1.2	0.36	2	0.6	1	0.2	2.56	3	7.68	C					
	MF13	0	0	1	0.1	0	0	1	0.4	1.2	0.36	2	0.6	1	0.2	2.26	3	6.78	NC					
C09	MF14	1	0.1	1	0.1	0	0	0	0	0	0	1	0.3	2	0.4	1.9	3	5.7	NC					
C10	MF15	2	0.2	2	0.2	1	1	0	0.6	1.8	0.54	3	0.9	2	0.4	3.24	2	6.48	NC					
C11	MF16	2	0.2	2	0.2	1	1	0	0.6	1.8	0.54	3	0.9	2	0.4	3.24	1	3.24	NC					
	MF17	2	0.2	2	0.2	1	1	0	0.6	1.8	0.54	3	0.9	2	0.4	3.24	2	6.48	NC					
	MF18	0	0	1	0.1	0	0	1	0.4	1.2	0.36	2	0.6	1	0.2	2.26	3	6.78	NC					
C13	MF19	2	0.2	2	0.2	1	1	0	0.6	1.8	0.54	3	0.9	2	0.4	3.24	2	6.48	NC					
	MF20	0	0	1	0.1	1	1	0	0.6	1.8	0.54	3	0.9	2	0.4	2.94	3	8.82	C					
	MF21	2	0.2	2	0.2	1	1	0	0.6	1.8	0.54	3	0.9	2	0.4	3.24	3	9.72	C					
C14	MF22	0	0	2	0.2	1	1	0	0.6	1.8	0.54	3	0.9	2	0.4	3.04	3	9.12	C					
C15	MF23	1	0.1	1	0.1	0	0	0	0	0	0	1	0.3	3	0.6	2.1	3	6.3	NC					
C16	MF24	2	0.2	3	0.3	0	0	0	0	0	0	3	0.9	3	0.6	3	1	3	NC					
C17	MF25	2	0.2	3	0.3	0	0	0	0	0	0	3	0.9	3	0.6	3	1	3	NC					
C18	MF26	2	0.2	3	0.3	0	0	0	0	0	0	3	0.9	2	0.4	2.8	1	2.8	NC					
C19	MF27	0	0	1	0.1	0	0	0	0	0	0	3	0.9	3	0.6	2.6	4	10.4	C					
C20	MF28	2	0.2	3	0.3	0	0	0	0	0	0	3	0.9	3	0.6	3	1	3	NC					

Figura 4. Ejemplo de criticidad de componentes

A modo de resumen indicar que se han diagnosticado un total de 14 modos de fallo críticos (un 15 % del total de modos de fallo descritos) que corresponden únicamente a 13 componentes críticos (un 17 % del total de componentes).

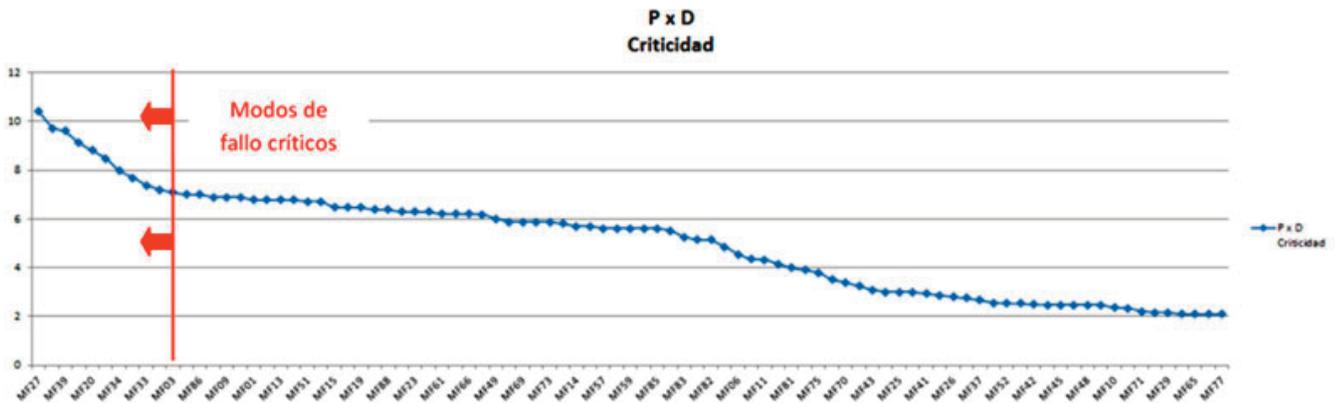


Figura 5. Gráfica de modos de fallo

2. Selección de las Tareas de Mantenimiento

Determinados los límites del sistema, componentes, modos de fallo y causa que origina cada modo de fallo, se lleva a cabo el AMFE (Análisis de Modos de Fallo y Efectos), utilizando el Árbol Lógico de Decisión (ALD), para de este modo determinar las tareas de mantenimiento (preventivo y correctivo) que se van a llevar a cabo sobre el motor de agujas genérico.

El sistema de análisis, motor de agujas, tiene un número asequible de componentes y modos de fallo, esto nos ha permitido realizar un análisis de causas y la selección de tareas (según ALD), de todos los componentes, no únicamente sobre los críticos. De este modo se plantean dos soluciones de tareas propuestas, un RCM puro con únicamente los componentes/modos de fallo críticos (13 componentes / 14 modos de fallo), y otro completo, más conservador, que atiende a todos los componentes/modos de fallo (76 componentes / 89 modos de fallo).

Existen varios modos de fallo y componentes críticos para los cuales no se ha encontrado una tarea “adecuada”, técnica y económicamente hablando, de mantenimiento preventivo (predictivo o sistemático) y a pesar que dichos modos de fallos se pueden tolerar, según aplicación del ALD, se ha propuesto una serie de mejoras de diseño para alguno de ellos.

3. Tipología de motores de agujas

Una vez seleccionadas las tareas de mantenimiento a realizar para un motor genérico, para poder extrapolar estos resultados se corrigen las frecuencias de las mismas acorde a las particularidades de cada motor de agujas según su ubicación y entorno operativo. Para ello se establecen una serie de parámetros que caracterizan el motor en su entorno: uso, impacto, seguridad, etc. a lo que se ha denominado “tipología de los motores de agujas” y que permite adecuar el mantenimiento a realizar a la casuística propia de cada motor de agujas:

- **Número de maniobras anual** sobre un determinado motor de agujas.
- **Impacto.** Dificultad de establecimiento del itinerario alternativo en caso de fallo.
- Número de **usuarios afectados** en caso de fallo.
- **Seguridad.** Paso o no de punta del Metro Liger sobre la aguja en operación normal.

Se ha observado que hay dos tipos de tareas de mantenimiento, las que no actúan sobre el uso y las que tienen una relación directa con el uso, que actúan sobre el desgaste de los componentes, y por ende afectadas por el número de maniobras que se realiza sobre ellas. Por lo tanto parece oportuno disgregar la criticidad global de los motores de agujas en dos categorías, por un lado el factor cuantitativo “número de maniobras” y por otro los restantes tres factores cualitativos (impacto, usuarios afectados y seguridad) que se han reagrupado mediante una ponderación en lo que se ha llamado “criticidad sin maniobras”. Esta reclasificación en dos categorías nos permite simplificar la tabla de tipologías y facilitar su uso para finalmente disponer de nueve categorías/tipologías distintas, tal y como muestra la figura 6.

Número Maniobras	MuyAlta-Alta			Media-Baja			MuyBaja-CasiNula		
	X			X			X		
Criticidad (sin maniobras)	ALTA	MEDIA	BAJA	ALTA	MEDIA	BAJA	ALTA	MEDIA	BAJA
	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	6			29			48		
Número de motores de aguja	1	3	2	17	2	10	10	24	14

Figura 6. Tabla Tipología / Clasificación de los Motores de Agujas

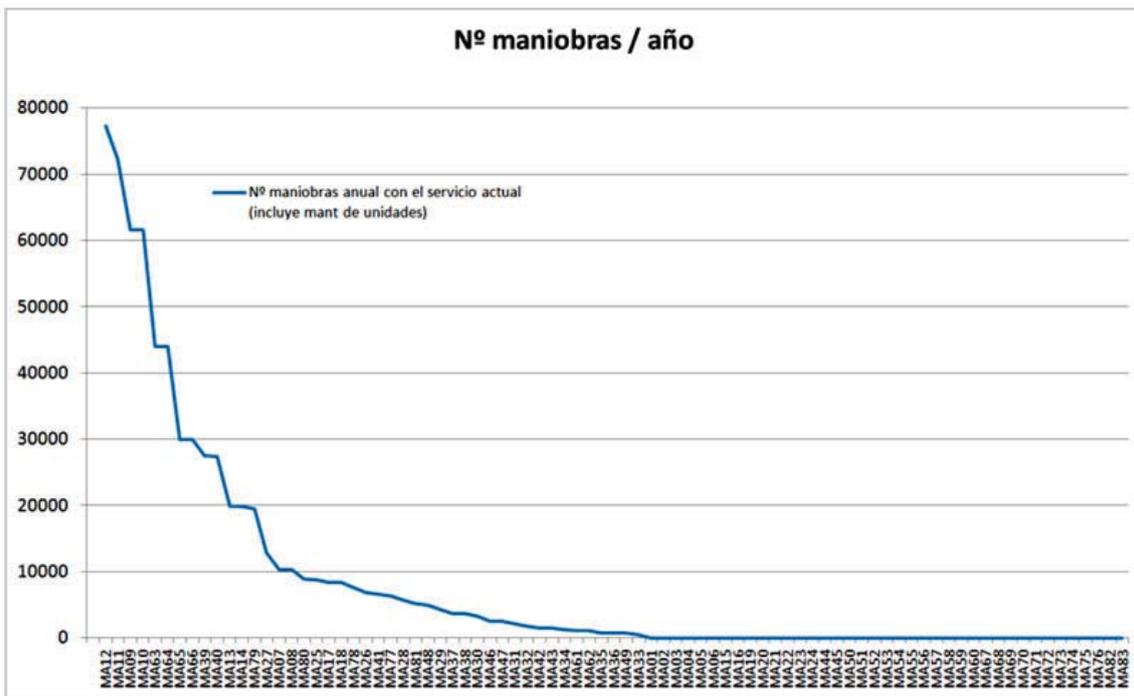


Figura 7. Número de maniobras por agujas de mayor a menor

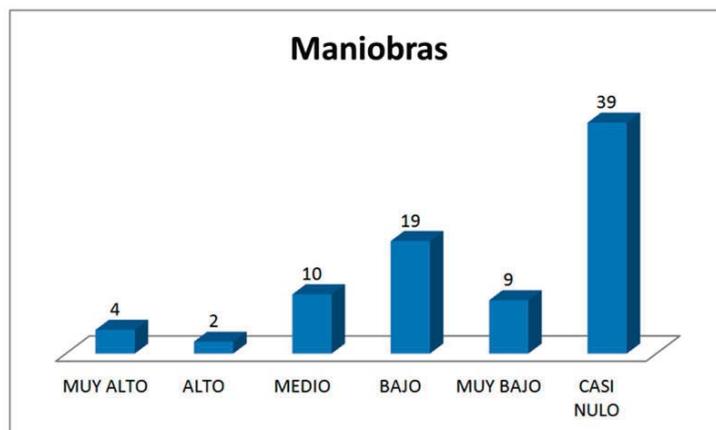


Figura 8. Clasificación de los motores de agujas por número de maniobras al año

Analizado el número de maniobras anuales de cada motor de agujas, se observa la impactante diferencia de uso entre unos motores de agujas de uso prácticamente nulo (ubicados en vías de trayecto con uso únicamente en modos degradados) y los más usados que alcanzan las 80.000 maniobras (ubicados en las terminales). Según se observa en la tabla casi la mitad de los motores de agujas (39) no tienen ninguna maniobra operativa a lo largo del año, a excepción de las maniobras de mantenimiento preventivo programadas, y por contra hay 4 agujas superan las 60.000 maniobras anuales.

4. Establecimiento de frecuencias para las tareas de Mantenimiento Preventivo

Una vez establecidas las tareas de mantenimiento para un motor de agujas genérico y determinadas las distintas tipologías de motores de aguja se pueden establecer las frecuencias más adecuadas.

Puesto que tenemos dos soluciones, una del RCM puro actuando únicamente sobre componentes/modos de fallo críticos y otra más conservadora atendiendo a todos, del mismo modo se han obtenido dos tablas-plantillas de mantenimiento con las tareas y frecuencias propuestas.

Por cada tarea de mantenimiento se establecen 9 frecuencias dependiendo de la tipología: la categoría “Número de Maniobras” (3 valores) y “Críticidad sin maniobras” (3 valores).

						Número Maniobras			M-A			M-B			M-B-CN								
						X			X			X											
						A			M			B											
						X			X			X											
						1	3	2	17	2	10	10	24	14									
Con.	M	C/L	T	Tarea A	D Ta	TAREAS MP									FRECUENCIAS								
TAREAS MANTENIMIENTO PREDICTIVO																							
C33	MF20	C	N		TPR02	Inspección visual y medición del nivel de desgaste y holgura del bulón (sustitución) - Cabeza barra articulada									12	12	12	12	18	18	12	18	18
TAREAS MANTENIMIENTO PREVENTIVO SISTEMÁTICO																							
C34	MF22	C	C	MP.12.12	TPS02	Reapriete del tornillo con cabeza de martillo de las barras de mando									12	12	12	12	18	18	12	18	18
C35	MF05	C	C	MP.12.15	TPS05	Reapriete y comprobación de bornas del cajetín de bornes del motor									12	18	24	12	18	24	12	18	24
C19	MF27	C	C	MP.12.03	TPS08	Galgado del Motor (normal e invertido) - Regleta guía									3	3	3	3	6	6	3	6	6
C19	MF27	C	N		TPS09	Reapriete de los tornillos de sujeción de la regleta guía									3	3	3	3	6	6	3	6	6
C19	MF27	C	N	MP.12.18	TPS10	Comprobación de caída del perno (cerrojo)									3	3	3	3	6	6	3	6	6
C25	MF33	C	C	MP.12.12	TPS11	Reapriete de las tuercas hexagonales M16 del dispositivo de cerrojo									12	12	12	12	18	18	12	18	18
C28	MF34	C	C	MP.12.12	TPS12	Reapriete del perno de ajuste del dispositivo de cerrojo									12	12	12	12	18	18	12	18	18
C36	MF44	C	C	MP.12.13	TPS15	Reapriete del husillo de ajuste del paquetes de resortes									12	18	24	12	18	24	12	18	24
C49	MF81	C	N		TPS17	Sustitución antes de fin de vida útil del condensador									72	72	72	72	72	72	72	72	72
C76	MF95	C	C	MP.12.06	TPS20	Reapriete de las bornas de conexión del armario de interconexión, mando y comprobación del motor									3	6	12	3	6	12	3	6	12
PRUEBAS E INSPECCIONES																							
C34	MF21	C	N		IP04	Inspección visual: del desgaste del tornillo con cabeza de martillo de la barra de accionamiento									12	12	12	12	18	18	12	18	18
C31	MF35	C	N		IP06	Inspección visual: del talón de cerrojo del dispositivo de enclavamiento (corazón)									12	12	12	12	18	18	12	18	18

Figura 9. Frecuencia de tareas de mantenimiento en función de la tipología de motor de agujas

5. Valoración económica de la aplicación del proyecto

Con la finalidad de establecer un criterio de valoración de los beneficios económicos de la aplicación del proyecto se calculan los costes del mantenimiento actual y del mantenimiento propuesto.

Los costes del mantenimiento durante un periodo de explotación bajo análisis serán la suma del Coste de Confiabilidad, el que se incurre para la conservación o mejora de la confiabilidad del dispositivo y del Coste de No Confiabilidad, los costes provocados por las indisponibilidades: el mantenimiento correctivo, el coste de pérdida de producción y el coste de indemnización.

Se ha realizado una aproximación al coste de mantenimiento actual en base al histórico de los años 2007 y 2013, valoración de las tareas de mantenimiento aplicadas, las reparaciones correctivas efectuadas, los costes de pérdida de producción y las indemnizaciones.

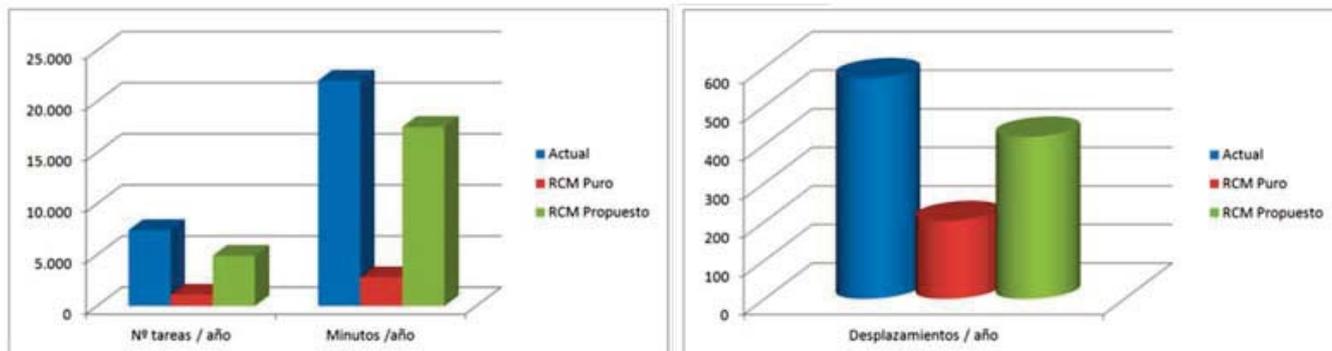


Figura 10. Comparativa del mantenimiento preventivo actual y el propuesto por el RCM en número y tiempo de ejecución de las tareas y el número de desplazamientos

La propuesta de plan de mantenimiento planteada supone un ahorro de costes del 23% respecto al mantenimiento preventivo realizado en la actualidad, constatando una reducción significativa tanto del número de tareas, como en el tiempo dedicado a las mismas.

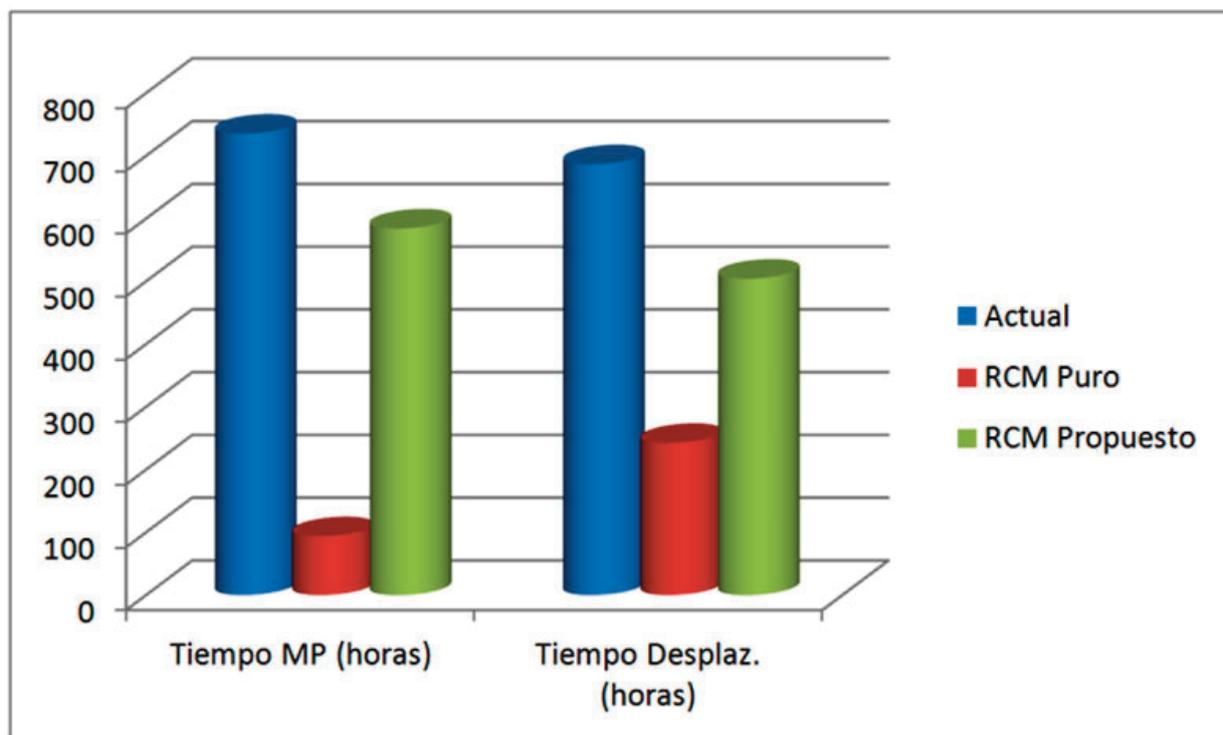


Figura 11. Comparativa del tiempo de ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo y los desplazamientos necesarios.

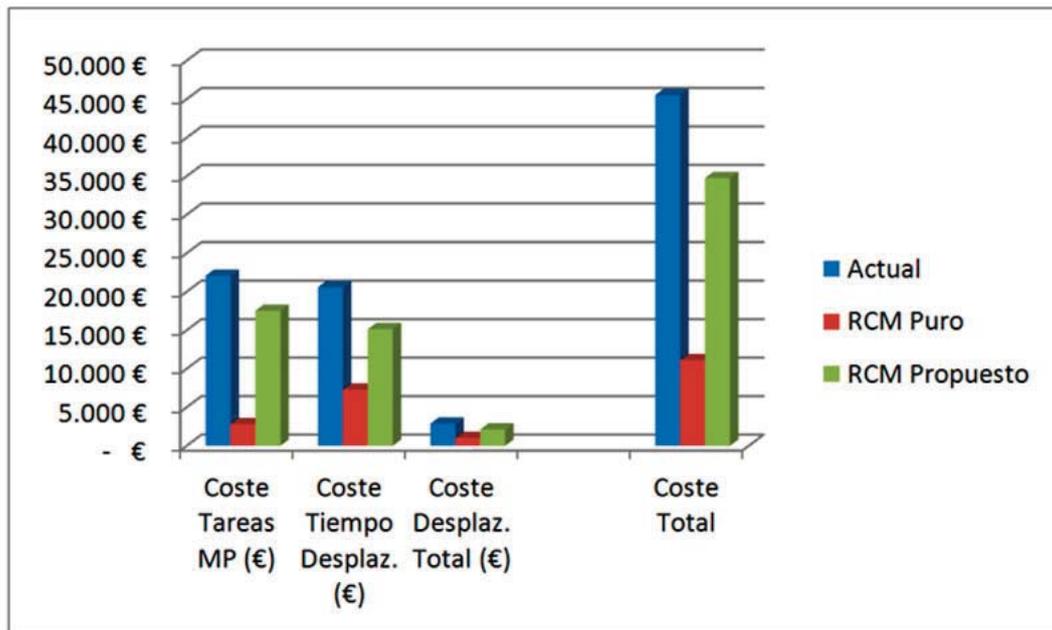


Figura 12. Comparativa de los costes del mantenimiento preventivo actual y el RCM propuesto

Es importante señalar que a pesar del ahorro obtenido, la propuesta de plan de mantenimiento planteado tiene carácter conservador, al haberse desarrollado sobre la totalidad de componentes y no únicamente sobre los críticos. Existe un margen de mejora significativo y se ha considerado conveniente ir analizando el resultado del plan propuesto para ir tomando las decisiones oportunas con el menor riesgo posible.

6. Cuadro de Mando

Con el objetivo de poder medir la eficiencia de la explotación en el aspecto de confiabilidad, es decir, Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad y Seguridad (RAMS/FDMS), en un determinado periodo de tiempo, se ha establecido un Cuadro de Mando con una serie de indicadores o KPIs (Key Performance Indicators) que nos facilita la toma de decisiones y el control del sistema.

El periodo de tiempo más adecuado para el caso de MLO es el año, principalmente por los componentes de estacionalidad que tienen la demanda y el servicio prestado.

Los parámetros e indicadores que se van a medir para obtener la eficacia y graficar el cuadro de mando son los siguientes:

- Factor de Fiabilidad (Fr)
- Factor de Mantenimiento Correctivo (Fmc)
- Factor de Mantenimiento Preventivo (Fmp)
- Factores de Disponibilidad (Fdf)
- Factor de Seguridad (Fs)

Al representar las cinco variables que caracterizan la eficacia de la explotación de un sistema, en un gráfico en el que los ejes tengan un desfase angular igual de 72°, se forma un pentágono regular cuyo área encerrada nos indicará la eficacia del sistema, tal y como se muestra en el gráfico Figura 13.

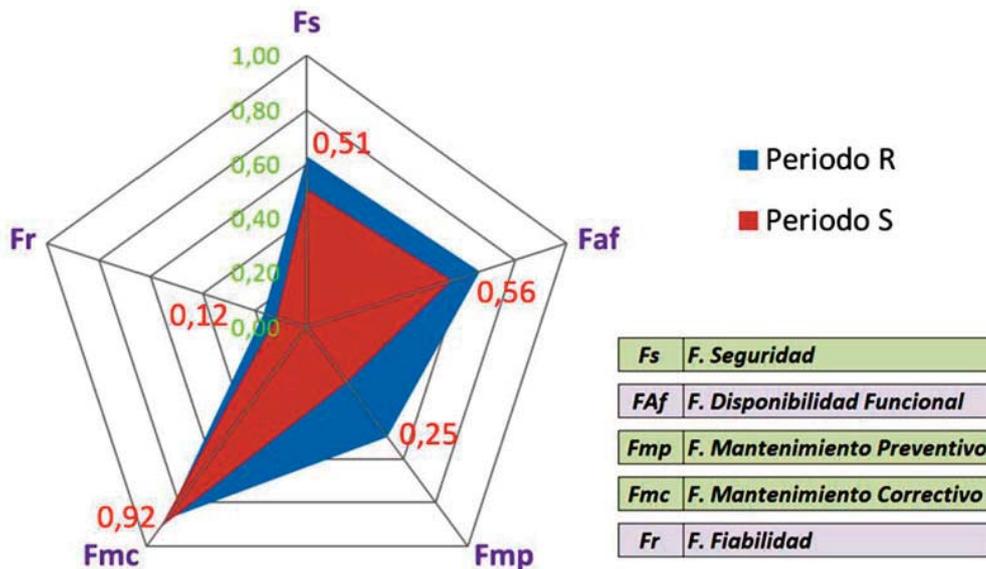


Figura 13. Ejemplo del Cuadro de Mando, con los 5 factores-indicadores elegidos, donde el área representa la eficacia para dos periodos.

Evaluando dos periodos, distintos y comparables entre sí, y representándolos en un único gráfico, nos permite extraer conclusiones sobre la evolución de los indicadores en los periodos comparados, calculando el área encerrada por los dos pentágonos se obtiene el nivel de eficacia alcanzado por el sistema en cada periodo.

	Indicadores	Periodo R	Periodo S	% Dif S-R	Área R	Área S	% Dif S-R
Factor Seguridad	Fs	0,63	0,51	-20%	0,182	0,122	
Factor de Disp. Funcional	Faf	0,67	0,56	-17%	0,144	0,060	
Factor Mant. Preventivo	Fmp	0,50	0,25	-50%	0,189	0,099	
Factor Man. Correctivo	Fmc	0,88	0,92	5%	0,063	0,046	
Factor Fiabilidad	Fr	0,17	0,12	-30%	0,046	0,026	
	Área total				0,625	0,353	-43%

Figura 14. Ejemplo de Indicadores para construir el Cuadro de Mando en dos periodos distintos

7. Conclusiones

El mayor logro del proyecto ha sido llevar cabo el diseño y aplicación de un proceso de análisis RCM a los motores de aguja del Metro Liger Oeste, obteniéndose un nuevo programa de mantenimiento preventivo que permite adecuar las tareas y frecuencias aplicables, según el entorno operativo específico de cada uno de los dispositivos considerados.

Cabe destacar la contribución que este proyecto ha tenido para, en el transcurso de estos últimos nueve meses de su desarrollo, sentar las bases de una cultura de mantenimiento científica, sistemática, tecnificada y orientada a la maximización de la eficiencia, fundamentada en la prevención y enfocada a la mejora continua en la organización de la explotación de Metro Liger Oeste.

Aunque los resultados obtenidos permitirían una mayor modificación del plan de mantenimiento preventivo vigente, se ha optado por proponer una modificación menos agresiva que permita minimizar potenciales resistencias al cambio planteado y lograr una transición de forma cauta, paulatina y robusta hacia la nueva cultura de ingeniería de mantenimiento que se desea implantar.

A efecto de seguimiento de la adecuación de las medidas recomendadas se ha elaborado un cuadro de mando, constituido por un conjunto de indicadores, que facilitará dicha evaluación y la identificación de posibles aspectos de mejora.

Una de las mayores dificultades del método es disponer del indispensable conocimiento del sistema con una profundidad adecuada para identificar potenciales mecanismos de fallo, determinar su impacto sobre la explotación de la instalación y evaluar su criticidad.

Parte del éxito del trabajo realizado radica en cómo se ha planteado el trabajo al personal de la instalación involucrado en el mismo, salvando sus posibles reticencias iniciales en base a formación, explicación adecuada del objeto del análisis, puesta en valor de su trabajo y conocimiento técnico y dotación de una herramienta de apoyo a la toma de sus decisiones. Se ha evidenciado que para la aplicación de la metodología no es necesario disponer de nuevos recursos, simplemente se ha tratado de reorientar los existentes con un enfoque diferente.

El proyecto ha obtenido el Premio Confiabilidad 2013 de la Asociación Española para la Calidad (AEC) por el Proyecto Fin de Carrera Aplicación de la metodología RCM al mantenimiento de los motores de agujas en Metro Liger Oeste.

Bibliografía y referencias relevantes

[1] CENELEC EN-50126. “IEC 62278: Railway applications - Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)”.

[2] UNE-EN-50129. “Railway applications – Communication, signaling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling”

[3] Manual de instrucciones Motor de aguja electrohidráulico HWE61 AVV-ZVV (HANNING & KAHL - N° de documento 32808181). *[Reproducción parcial autorizada por el fabricante de los capítulos 10, 11 y 12]*

[4] Apuntes asignatura “Gestión de Mantenimiento”. Ingeniería en Organización Industrial. Universidad Europea de Madrid. Profesor: D. Antonio José Fernández Pérez.

[5] Memoria sostenibilidad MLO 2012 y otra documentación interna de MLO.

[6] Consorcio de transportes de Madrid. www.crtm.es

[7] UNE 20812:1995 - Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE).

[8] MIL-STD-721C, Military Standard: definitions of terms for reliability and maintainability (12 jun 1981).

[9] MIL-HDBK-217, Reliability Prediction of Electronic Equipment (02 dec 1991)

[10] UNE-EN 60300-1. “Gestión de la Confiabilidad. Parte 1: Gestión del programa de confiabilidad”. Septiembre 1996.

- [11] UNE-EN 60300-2. “Gestión de la Confiabilidad. Parte 2: Elementos y tareas del programa de confiabilidad”. Diciembre 1997.
- [12] UNE-EN 61025:2011 - Análisis por árbol de fallos (AAF)
- [13] UNE-EN 61078. “Técnicas de análisis de la confiabilidad. Método del diagrama de bloques”. Septiembre 1996.
- [14] UNE 200001-3-1. “Gestión de la Confiabilidad. Parte 3: Guía de aplicación. Sección 1. Técnicas de análisis de la Confiabilidad: Guía metodológica”. Enero 1998.
- [15] UNE 200001-3-11. “Gestión de la Confiabilidad. Parte 3-11: Guía de aplicación. Mantenimiento centrado en la Fiabilidad”. Octubre 2003.
- [17] UNE 20-512. “Fiabilidad de equipos y componentes electrónicos. Terminología”. 1976/1978.
- [18] UNE 20 654-1. “Guía de mantenibilidad de equipos. Parte 1. Introducción, exigencias y programa de mantenibilidad”. Noviembre 1992.
- [19] UNE 20 654-2. “Guía de mantenibilidad de equipos. Parte 2. Sección cinco: Estudios de mantenibilidad durante la fase de diseño”. Julio 1995.
- [20] UNE 20 812. “Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE)”. Marzo 1995.
- [21] UNE 21 406. “Aplicación de las técnicas de Markov”. Abril 1997.
- [22] UNE 21 925. “Análisis por árbol de fallo (AAF)”. Diciembre 1994.
- [23] Blanchard, B. S. y Lowery, E. E., “Maintainability: Principles and Practices”. McGraw-Hill Book Company. 1969.
- [24] Dhillon, B. S. y Singh, Ch., “Engineering Reliability: New Techniques and Applications”. John Wiley & Sons. 1981.
- [25] Henley, E. J. y Kumamoto, H., “Probabilistic Risk Assessment: Reliability Engineering, Design and Analysis”. IEEE Press. 1992.
- [26] International Atomic Energy Agency, “Reliability-Centred Maintenance Tutorial”. IAEA-J4-TC-771. Mayo 1991.
- [27] Knezevic, J., “Mantenibilidad”. Isdefe. Febrero 1996.
- [28] Moubay, J., “Reliability-centred Maintenance”. Butterworth-Heinemann Ltd. 1992.
- [29] Nachlas, J. A., “Fiabilidad”. Isdefe. Junio 1996.
- [30] Ramakumar, R., “Engineering Reliability: Fundamentals and Applications”. Prentice Hall International. 1993.
- [31] Smith, A. M., “Reliability-Centered Maintenance”. McGraw-Hill, Inc. 1993.
- [32] Villemeur, A., “Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment”. John Wiley & Sons. 1991.
- [33] Warleta, J., “Fiabilidad. Bases teóricas y prácticas”. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. 1973.

Propuesta para el desarrollo de la red de alta velocidad en EE.UU. (USHSRS)

Proposal for the development of the U.S. high speed railway (USHSRS)

Luis Fort López-Tello

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. Madrid.

Carmen Fort Santa-María

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. DEA en Ingeniería del Terreno. cfort@eptisa.com Eptisa, S.I. División de Infraestructura del Transporte. Madrid

Resumen

Se pretende en este artículo avanzar en el desarrollo del Plan de infraestructura ferroviaria de Alta Velocidad de Estados Unidos presentado por la U.S. High Speed Rail Association, con motivo del lanzamiento por el presidente Obama de su primera fase.

El desarrollo del Plan nacional se propone llevarlo a cabo desde diez grandes Polos de actuación, empezando por el de San Francisco, desde el que se inicia la red nacional USHSRS con el Proyecto "FARWEST" de la red de alta velocidad del Estado de California (CHSRS) y el Proyecto "CANEVAR" de conexión de la red de California con las de los Estados de Nevada y Arizona.

La inversión necesaria para la ejecución de la red del plan nacional, con 27.790 Km, se estima en 600.000 millones de dólares. El Proyecto Farwest desarrolla la red de California de 1288 Km, con un coste de 34.820 M\$ y el Proyecto Canevar, la extensión de la anterior, con una inversión de 26.557 M\$ y un desarrollo de 1.183 Km.

Palabras clave: Alta Velocidad, Transporte Ferroviario, Planificación, Estados Unidos.

Abstract

The purpose of this article is to continue developing the concept of the plan for the creation of a national system of high speed rail infrastructure presented by the U.S. High Speed Rail Association, on the occasion of the release by the President Obama of its first phase.

The development of the national Plan is proposed be done from ten Poles, starting by the Pole of San Francisco, origin of the national system USHSRS, with the Farwest Project which develops the High Speed Railway of the State of California (CHSRS) and the Canevar Project, focused on the high speed connection of the California system with those of the states of Nevada and Arizona.

The estimation of the investment required for the execution of the national plan USHSRS with a net of 17.000 mile, is 600.000 M\$. The Farwest Project develops a net of 800 mile with a cost of 34.820M \$ and the Canevar Project with 735 mile and 26.557 M\$ investment.

keywords: High-Speed, Railway Transportation, Planning, United States.

1. Introducción

Mr Andy Kunz, Presidente de U.S. High Speed Rail Association, en el artículo publicado en la revista ENR (Engineering News-Record) del 10 de Agosto de 2009: “America’s Transportation Future: Steel-Wheel, High-Speed Rail”, dice que el lanzamiento en Abril de ese año, por el presidente Obama, de la primera fase de un sistema nacional HSR, inspiró la creación de la Asociación que preside y la presentación de un plan para la creación de una red nacional de alta velocidad ferroviaria.

El plan presentado por la USHSR Association requiere la ejecución de una red de 17.000 millas (más de 27.000 Km.) en cuatro fases, a completar en 20 años (2010-2030).

Esta red nacional, actualmente ralentizada su puesta en marcha debido a la crisis económica mundial, será el próximo proyecto de gran infraestructura en América y constituirá en EE.UU. el mayor trabajo de ingeniería y construcción desde el de realización de su red interestatal de autopistas.

En el artículo se menciona a España como ejemplo de nación industrializada que está construyendo una red muy importante de alta velocidad ferroviaria (AVE, Alta Velocidad de España), con una inversión superior a los cien mil millones de dólares. También destaca la seguridad en este medio de transporte poniendo como ejemplo además de a la red española a las de Japón y Francia con 45 y 25 años respectivamente de operación de sus redes nacionales sin un accidente mortal. Las redes de España y Francia se han conectado recientemente mediante grandes túneles atravesando Los Pirineos.

2. Análisis del plan

Partiendo de la información contenida en la página web de la Asociación, con el adjunto mapa general de la red (Figura 1a), se pretende en el presente artículo avanzar en el análisis de este ambicioso (pero imprescindible para la continuidad del desarrollo de EE.UU.), plan de infraestructura ferroviaria, desglosando para ello en longitudes y potenciales de ocupación, los cien trayectos que constituyen las cuatro etapas de desarrollo del Plan, una vez ajustada la longitud total del Plan a la suma de las longitudes de los trayectos medidas sobre mapas 1:75000 (Tabla 1a):

- 26 trayectos, con un total de 5.765 km (prevista su puesta en servicio inicialmente, como primera etapa, para 2015). (Tabla 3.1).
- 35 trayectos, con una longitud total de 7.395 km (segunda etapa, prevista para 2020). (Tabla 3.2).
- 23 trayectos, totalizando 7.550 km (tercera etapa, prevista para 2025). (Tabla 3.3).
- 16 trayectos, con 7.080 km (cuarta etapa, prevista para 2030). (Tabla 3.4).

Una estimación inicial de la inversión total necesaria para el desarrollo del plan, se puede cifrar en 600.000 M\$ (140.000 M\$ - 2015; 160.000 M\$ - 2020; 155.000 M\$ - 2025 y 145.000 M\$ - 2030). (Tabla 1b) (Figura 1b)

Los tramos que forman el trayecto “intercostas” San Francisco-Washington D.C. totalizan 4.055 km. y \approx 87.500 M\$ de inversión, con un tiempo de recorrido total de unas 15 horas (ver tabla 2 y Figura 1c adjuntas).

Los corredores de mayor rentabilidad por ratio usuario potencial/km. son los de “San Diego – Los Ángeles – San Francisco” de 776 km. (\approx 21.750 M\$) y Washington DC – New York – Boston de 780 km (\approx 33.400 M\$)

El corredor “San Diego- Los Ángeles- San Francisco”, forma parte de la red de alta velocidad ferroviaria de California (CHSR). El “Proyecto Farwest”, de los autores de este artículo ($\Sigma L=1.288\text{km}$ (800 mile)-34.820 M\$, programado en 15 años de plazo), aparece en la figura 2.1 (esquema) y figura 2.2.(programa).

La primera línea de este Proyecto LAV/HSL Fresno- San Francisco Airport, “Alternativa Golden Gate”, ha sido objeto de un Anteproyecto/Preliminary Design de los mismos autores, registrado en el Colegio de Ingenieros de Caminos de Madrid (Diciembre 2011), con túneles largos y puentes de gran luz, inspirado en la “Alternativa Paraíso” del nuevo acceso ferroviario de Madrid, que atraviesa la Sierra de Guadarrama, por los especiales requerimientos de seguridad y medioambientales que demanda el trazado de una línea de alta velocidad en entornos especialmente complicados y protegidos.

3. Planteamiento inicial

El desarrollo del Plan nacional USHSR, en las cuatro etapas en que se ha planteado por la USHSR Association se propone llevarlo a cabo desde diez grandes Polos de actuación, como se refleja en los cuadros y mapas adjuntos. (Tablas 3.1 a 3.5 y Figuras 3.1 a 3.10).

La asignación total de fondos a cada uno de los Polos puede ser como se propone en la Tabla 4 y Figura 4:

US HSR NETWORK PHASING PLAN



Figura/e 1a.-. HSR Express Route in 4 Phases / Plan General de la Red en 4 Etapas

RED ALTA VELOCIDAD – EE.UU.(USHSR)

Tabla/e 1

a) Ajuste longitudes red dibujada a longitud total plan (*) / (Plan length arrangement)

		LMapa (Km)	LPlan (Km)	LPlan (mil)	LMapa (mil)
--	2015	5.765	5675	3.525	3.582
--	2020	7.395	7260	4510	4.595
--	2025	7.550	7430	4615	4.691
--	2030	7.080	7000	4350	4.400
	Plan Completo	(27.790)	27.365	17.000	(17.268)

b) Inversión necesaria (Primera estimación) / Investment needed (Preliminary estimation)

1. Plan Completo

27.790 km a 15 M€/km = 416.850 M€

77 Estaciones a 150 M€= 11.550 M€

Suplemento terminales 1.600 M€

USHSR. ≈:430.000 M€ ≈600.000 M€

2. Trayecto intercostas / Intercoasts way

SAN FRANCISCO –WASHINGTON DC. 4.055 Km. + 11 Estaciones/Stations: 15 h. – 82.500 M€

(*): Según ENR August 10, 2009 $\Sigma L_{Plan} = 17.000$ miles (mile= 1,609 Km)

Tabla/e 2

RED ALTA-VELOCIDAD -EE.UU. (USHSR)								
TRAYECTO INTERCOSTAS / INTERCOAST WAY SAN FRANCISCO-WASHINGTON DC.								
Polos de actuación			M\$	L(km)	Vc= 280 km/h t(min)	Estaciones t(min)	Tiempo Viaje	
PSF	P1	--	San Francisco - Sacramento	6.525	145	31'		0h. 31'
			(45 M\$/km)	270			4'	
P1	--	Sacramento -Salt Lake City	17.430	830	2h. 58'			3h. 33'
			(21 M\$/km)	200			4'	
PD	P8	--	Salt Lake City - Denver	15.120	630	2h. 15'		5h. 52'
			(24 M\$/km)	200			4'	
P8	--	Denver - Kansas City	11.760	840	3h.			8h. 56'
			(14 M\$/km)	200			4'	
PC	P4	--	Kansas City - Saint Louis	5.320	380	1h. 22'		10h. 22'
			(14 M\$/km)	200			4'	
PDF	P3	--	Saint Louis - Louisville	5.775	385	1h. 23'		11h. 49'
			(15 M\$/km)	200			4'	
PP	P9	--	Louisville - Cincinatti	3.045	145	31'		12h. 24'
			(21 M\$/km)	200			4'	
	P9	--	Cincinatti - Columbus	3.990	190	41'		13h. 09'
			(21 M\$/km)	200			4'	
	P9	--	Columbus - Pittsburg	4.830	230	50'		14h. 03'
		(21 M\$/km)	200			4'		
P9	--	Pittsburg - Washington DC	11.480	280	1h.		15h. 07'	
		(41 M\$/km)	200					
			87.345	4.055	14h. 31'	36'	15h. 07'	

		M\$	L(km)		Inversión (M\$)	
--	2015	6.795	145	(3,58%)	85.275	Trayectos
					2.070	Estaciones
--	2020	12.955	715	(17,63%)	87.345	
					155	Terminales (Suplemento)
--	2025	27.000	910	(22,44%)	87.500	≈15% Inversión total)
--	2030	40.595	2285	(56,35%)		
		87.345	4.055	(100,00%)		
Diferencia horaria San Francisco (-8h.) Washington (-5h.)= 3 horas San Francisco - Washington: 18h. (15+3) Wahington - San Francisco: 12 h. (15-3)						

RED ALTA VELOCIDAD –EE.UU. (USHSR)

Tabla/e 3.1

Primera Etapa 2015	L (km.)	ΣL (Km.)	Potencial x 10 ⁶ usuario	Σ Polo 10 ⁶ usuario potencial	Ratio Usuario potencial /km x 10 ⁴
(12) San Diego – Los Angeles (100)	180		4,9		
(100) Los Angeles – Fresno (90)	330		4,0		
(90) Fresno – Sacramento (6)	280		5,0		
(90) Fresno – San Francisco (19)	260				
(19) San Francisco – Sacramento (6)	145		2,0		
Polo San Francisco		1.195		15,9	1,33
(127) Eugene° - Pórtland (15)	180		0,3		
(15) Pórtland – Seattle (4-106)	220		0,2		
Polo Seattle		400		2,3	0,58
(196) San Antonio – Austin (152)	120		0,8		
(152) Austin – Dallas Fort Worth (148)	290		0,8		
(148) Dallas Fort Worth – Houston (15)	360		0,8		
Polo Dallas		670		2,8	0,42
(249) Minneapolis – Milwaukee (193)	465		1,8		
(193) Milwaukee – Chicago (186)	120		2,5		
(186) Chicago – St Louis (141)	380		2,3		
(186) Chicago – Indianápolis (219)	285		2,2		
(186) Chicago – Toledo° (187)	380		2,5		
(187) Toledo° - Detroit (182)	160		1,8		
(187) Toledo° - Cleveland (210)	150		0,8		
Polo Chicago		1.940		13,9	0,72
(182) Birmingham – Atlanta (321)	215		0,7		
(321) Atlanta – Athens° (231)	100		0,8		
(231) Athens° - Greenville (294)	145		0,5		
(294) Greenville – Charlotte (259)	130		0,4		
(259) Charlotte – Greensboro° (234)	140		0,5		
Polo Atlanta		730		2,9	0,40
(14) Tampa – Orlando (32)	140		1,1		
(32) Orlando – Miami (3)	310		1,6		
Polo Miami		450		2,7	0,60
(22) Washington DC – Baltimore (30)	80		2,1		
(30) Baltimore – Philadelphia (12)	145		2,7		
(12) Philadelphia – New York City (19)	155		5,0		
Polo New York		380		9,8	2,58
Primera Etapa		5.785		50,3	0,87

(): Altitud media en m/ Altitude in m

° : Centro de la ciudad / City Centre

RED ALTA VELOCIDAD –EE.UU. (USHSR)

Tabla/e 3.2

Segunda Etapa 2020	L (km.)	ΣL (Km.)	Potencial x 10 ⁵ usuario	Σ Polo 10 ⁵ usuario potencial	Ratio Usuario potencial /km x 10 ⁴
San Diego – Phoenix (330)	475		1,0		
(330) Phoenix – Tucson	175		0,7		
Polo San Francisco		650		1,7	0,26
(4 – 106) Seattle – Vancouver (Can.)	220		1,1		
Polo Seattle		220		1,1	0,50
(1510) Alberquerque – Denver (1591)	570		0,8		
Polo Denver		570		0,8	0,14
(374) Oklahoma City ^o - Tulsa (225)	190		0,8		
Polo Dallas		190		0,8	0,42
(196) Sn Antonio – Houston (15)	305		1,1		
(15) Houston – New Orleans (3)	480		1,1		
(3) New Orleans – Mobile ^o (4)	225		0,8		
Polo Dallas		1.010		3,0	0,30
(3) New Orleans – Jackson (89)	270		0,6		
(89) Jackson – Bermingham (182)	340		0,5		
Polo Atlanta		610		1,1	0,18
(226) Kansas City – St. Louis (141)	380		0,9		
Polo Chicago		380		0,9	0,24
(182) Birmingham – Nashville (139)	275		0,4		
(139) Nashville – Louisville (140)	235		0,4		
(140) Louisville – Indian´polis (219)	185		0,6		
(140) Louisville – Cincinnati (232)	145		0,7		
(208) Cincinnati – Columbus (243)	190		0,7		
(243) Columbus – Cleveland (210)	170		0,9		
(208) Cincinnati – Indianápolis (219)	155		0,9		
Polo Pittsburgh		1.355		4,6	0,34
(210) Cleveland –Pittsburgh (234)	160		1,3		
(234) Pittsburgh – Harrisburg (97)	290		0,9		
(97) Harrisburg – Philadelphia (12)	130		2,0		
Polo Pittsburgh		580		4,2	0,72
(77) Hamilton ^o - Toronto (CAN) (173)	55		1,1		
(77) Hamilton – Búffalo (183)	100		1,1		
(183) Buffalo – Rochester (155)	75		1,1		
Polo Chicago		230		3,3	1,43
(234) Greensboro ^o - Raleigh (126)	95		0,8		
(12) Raleigh – Ríchmond (57)	220		0,8		
(57) Ríchmond – Washington DC. (22)	165		1,4		
Polo Pittsburgh		480	1,4	3,0	0,63
(9) New York City – New Haven ^o (22)	130		3,7		
(22) New Haven ^o - Hartford (22)	65		0,8		
Polo New York		195		4,5	2,31
(22) Hartford – Providence ^o (35)	130		0,8		
(35) Providence – Boston (5)	75		1,4		
Polo Boston		205		2,2	1,07
(231) Athens ^o - Augusta ^o (126)	140		0,7		
(126) Augusta ^o - Savannah (12)	160		0,7		
(12) Savannah – Jacksonville (3)	185		0,6		
(3) Jacksonville – Orlando (32)	235		0,6		
Polo Miami		720		2,6	0,36
Segunda Etapa		7.395		33,8	0,46

(): Altitud media en m/ Altitude in m

^o : Centro de la ciudad / City Centre

RED ALTA VELOCIDAD –EE.UU. (USHSR)

Tabla/e 3.3

Tercera Etapa 2025	L (km.)	ΣL (Km.)	Potencial x 10 ⁶ usuario	Σ Polo 10 ⁶ usuario potencial	Ratio Usuario potencial /km x 10 ⁴
(95) Los Angeles – Las Vegas (609)	370		2,8		
(609) Las Vegas – Phoenix (330)	390		0,7		
Polo San Francisco		760		3,5	0,46
(330) Phoenix – Albuquerque (1510)	525		0,5		
(1510) Albuquerque – Dallas Fort Worth (148)	905		0,9		
Polo Denver		1.430		1,4	0,10
(6) Sacramento – Eugene ^o (127)	590		0,6		
Polo Seattle		590		0,6	0,10
(1298) Salt Lake City – Denver (1591)	630		0,7		
Polo Denver		630		0,7	0,11
(148) Dallas Fort Worth – Oklahoma City ^o (374)	285		0,9		
(148) Dallas Forth Worth – Jackson (85)	625		0,7		
Polo Dallas		910		1,6	0,18
(225) Tulsa – Kansas City (226)	350		0,7		
Polo Dallas		350		0,7	0,20
(77) Memphis – Nashville (139)	310		0,4		
(139) Nashville – Chattanooga ^o (208)	165		0,6		
(208) Chattanooga ^o - Atlanta (321)	175		0,9		
Polo Atlanta		650		1,9	0,25
(182) Detroit – Hamilton (CAN)	300		4,4		
Polo Chicago		300		4,4	
(210) Cleveland – Buffalo (183)	320		1,2		
Polo Chicago		320		1,2	1,47
(234) Pittsburgh – Washington DC. (22)	280		1,6		
Polo Pittsburgh		280		1,6	0,57
(38) Albany – New York City (9)	230		3,5		
(38) Albany – Hartford (22)	140		0,5		
Polo New York		370		4,0	1,08
(294) Greenville – Columbia ^o (95)	150		0,6		
(95) Columbia ^o - Charlotte (259)	135		0,6		
Polo Atlanta		285		1,2	0,42
(95) Columbia ^o - Savannah (12)	205		0,6		
Polo Miami		205		0,6	0,29
(6) Boston – Portland (22)	150		1,8		
Polo Boston		150		1,8	1,20
(155) Rochester – Syracuse (118)	130		0,8		
(118) Syracuse – Albany (38)	190		0,6		
Polo New York		320		1,4	0,44
Tercera Etapa		7.550		26,6	0,35

(): Altitud media en m/ Altitude in m

^o : Centro de la ciudad / City Centre

RED ALTA VELOCIDAD –EE.UU. (USHSR)

Tabla/e 3.4

Cuarta Etapa 2030	L (km.)	ΣL (Km.)	Potencial x 10 ⁶ usuario	Σ Polo 10 ⁶ usuario potencial	Ratio Usuario potencial /km x 10 ⁴
(6) Sacramento – SALT Lake City (1268)	830		0,6		
Polo San Francisco		830		0,6	0,07
(1298) SALT Lake City – Boise ^o (832)	470		0,6		
(832) Boise – Seattle (4 – 106)	640		0,8		
Polo Seattle		1.110		1,4	0,13
(1591) Denver – Kansas City (226)	840		0,8		
(226) Kansas City – Omaha ^o (323)	250		0,8		
(323) Omaha ^o - Des Moines (263)	190		0,8		
(263) Des Moines – Minneapolis (249)	370		1,4		
Polo Denver		1.650		3,8	0,23
(148) Dallas Fort Worth – Little Rock ^o (102)	465		0,9		
(102) Little Rock ^a – Memphis - St Louis (77)- (144)	215-435		0,6		
(77) Memphis – Jackson (89)	300		0,5		
(141) St Louis – Louisville (140)	385		0,8		
(141) St. Louis – Nashville (139)	440		0,7		
Polo Dallas		2.240		4,2	0,19
(4) Mobile ^o - Tallahassee ^o (57)	365		0,8		
(57) Tallahassee ^o - Jacksonville (3)	245		0,7		
Polo Miami		610		1,5	0,25
(243) Columbus – Pittsburgh (234)	230		1,0		
Polo Pittsburgh		230		1,0	0,43
(5) Boston – Montreal (CAN) (47)	410		2,4		
Polo Boston		410		2,4	0,59
Cuarta Etapa		7.080		14,9	0,21

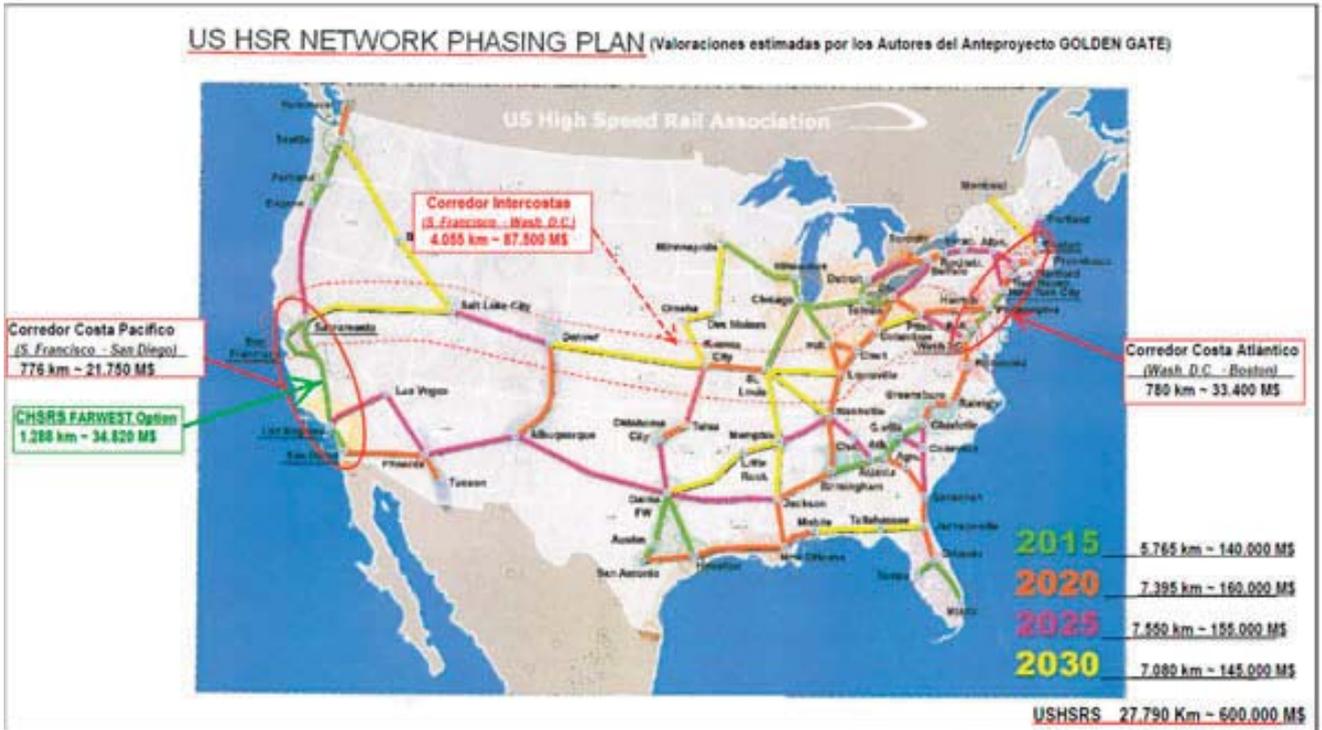
(): Altitud media en m/ Altitude in m

^o : Centro de la ciudad / City Centre

RED ALTA VELOCIDAD –EE.UU. (USHSR) PLANTEAMIENTO INICIAL PARA EL DESARROLLO DEL PLAN POLOS DE ACTUACIÓN / WORK POLES

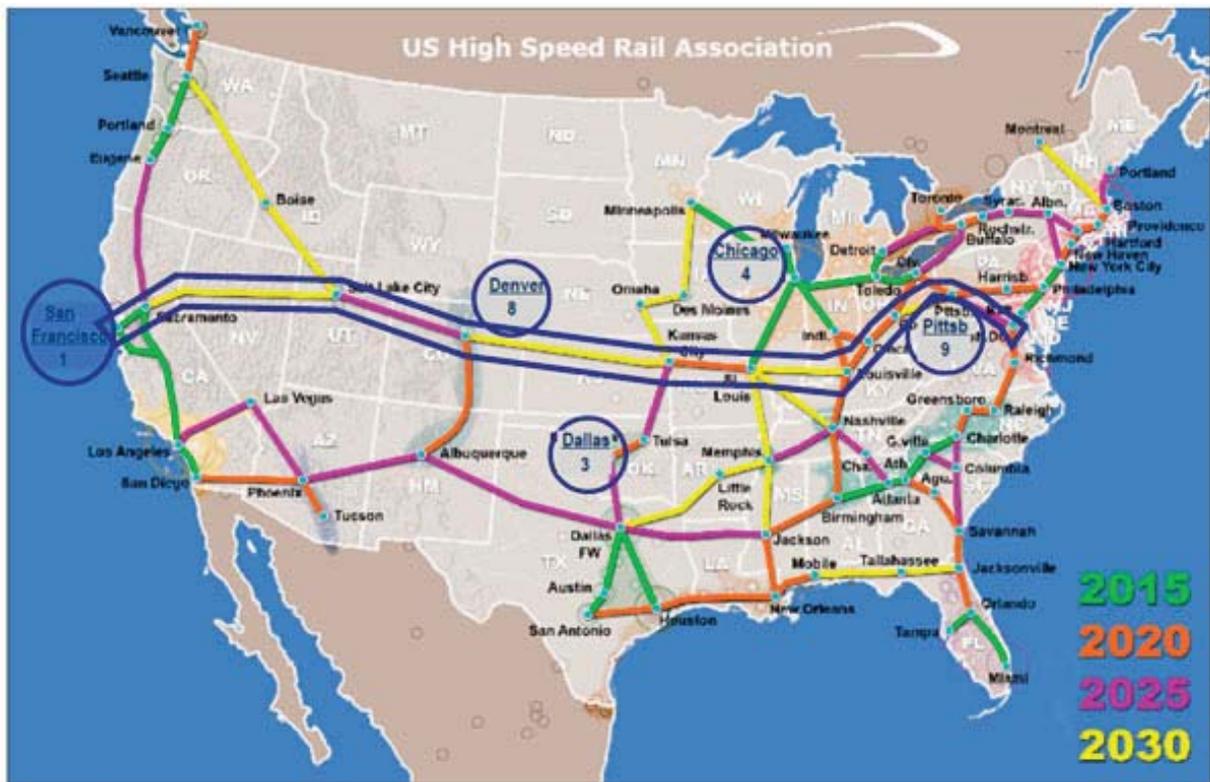
Tabla/e 3.5

Nº	DESIG.	LOCALIZ.	1ª ETAPA		2ª ETAPA		3ª ETAPA		4ª ETAPA		TOTAL PLAN	
			Ratio	Kms.	Ratio	Kms.	Ratio	Kms.	Ratio	Kms.	Ratio	Kms.
1	PSF	San Francisco	1,33	1.195	0,26	650	0,46	760	0,07	830	0,63	3.435
2	PS	Seattle	0,58	400	0,50	220	0,10	590	0,13	1.110	0,23	2.320
3	PDF	Dallas	0,42	670	0,32	1.200	0,18	1.260	0,19	2.240	0,24	5.370
4	PC	Chicago	0,72	1.940	0,69	610	0,90	620	--	--	0,75	3.170
5	PA	Atlanta	0,40	730	0,18	610	0,33	935	--	--	0,31	2.275
6	PM	Miami	0,60	450	0,36	720	0,29	205	0,25	610	0,37	1.985
7	PNY	New York	2,58	380		195	0,78	690	--	--	1,56	1.265
8	PD	Denver	--	--	0,14	570	0,10	2.060	0,23	1.650	0,16	4.280
9	PP	Pittsburgh	--	--	0,49	2.415	0,57	280	0,43	230	0,49	2.925
10	PB	Boston	--	--	1,07	205	1,20	150	0,59	410	0,84	765
Ratios medios y long. por etapas			0,87	5.765	0,46	7.395	0,35	7.550	0,21	7.080	0,45	27.790

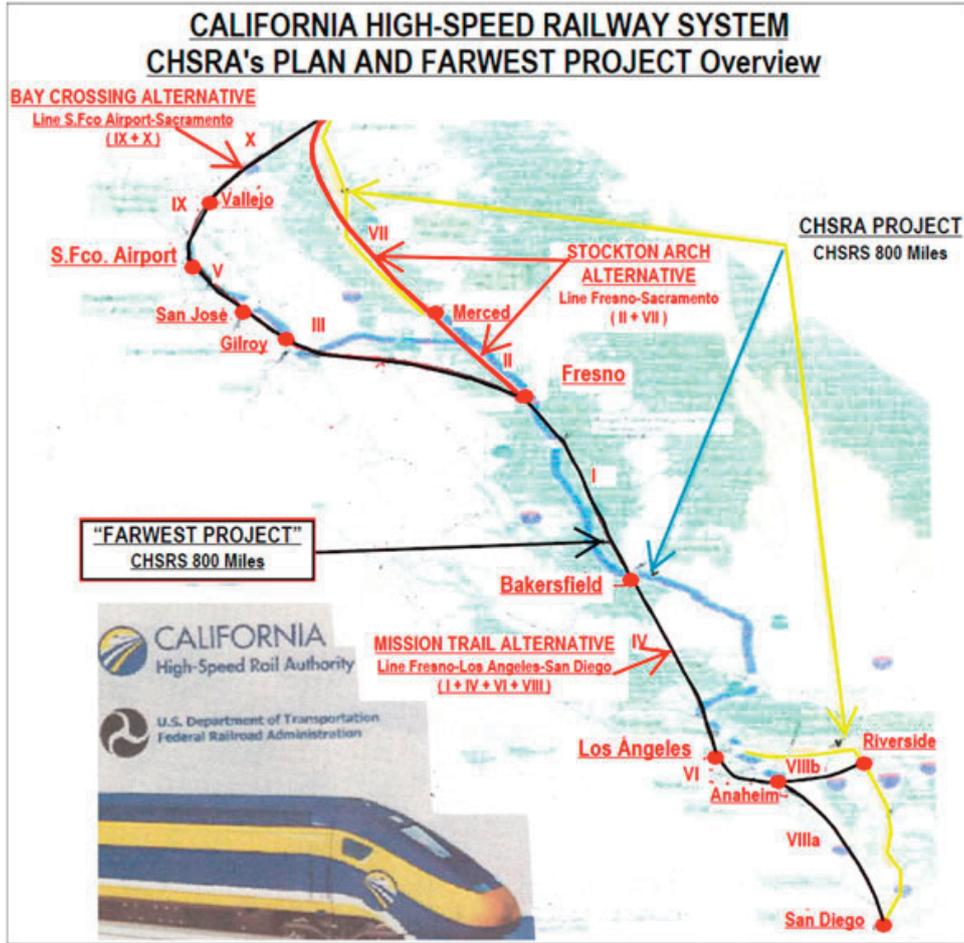


Figura/e 1b.-. HSR Express Route in 4 Phases
 Preliminary estimation of Plan Investments / Estimación inicial de inversiones para el desarrollo del Plan

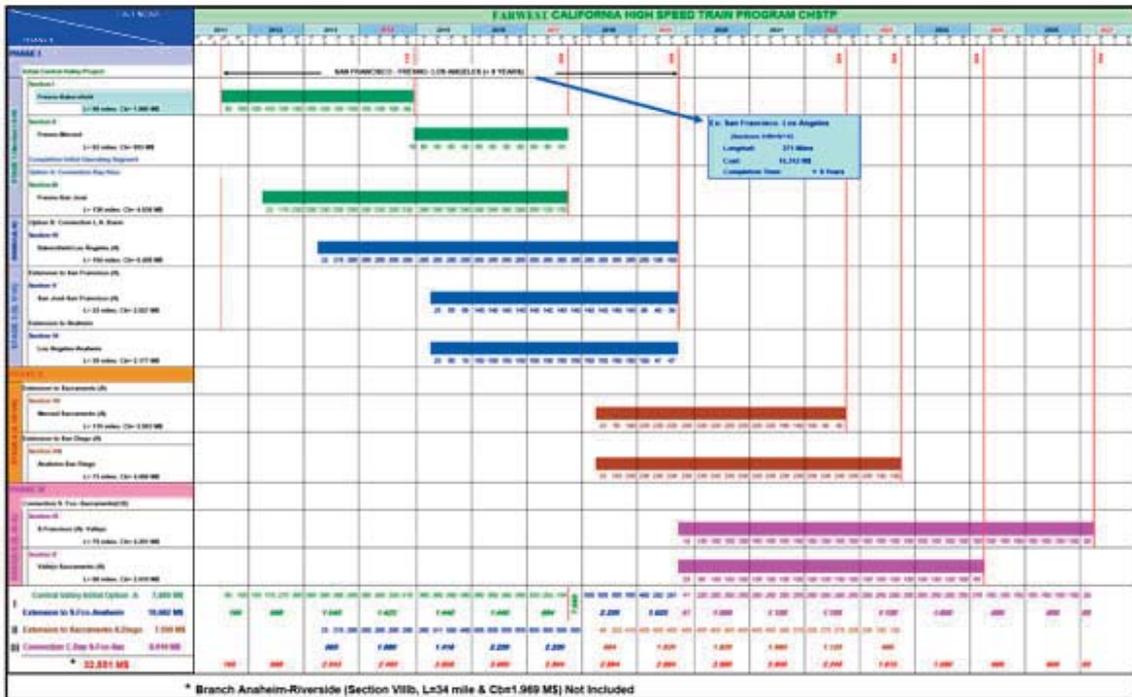
US HSR NETWORK PHASING PLAN



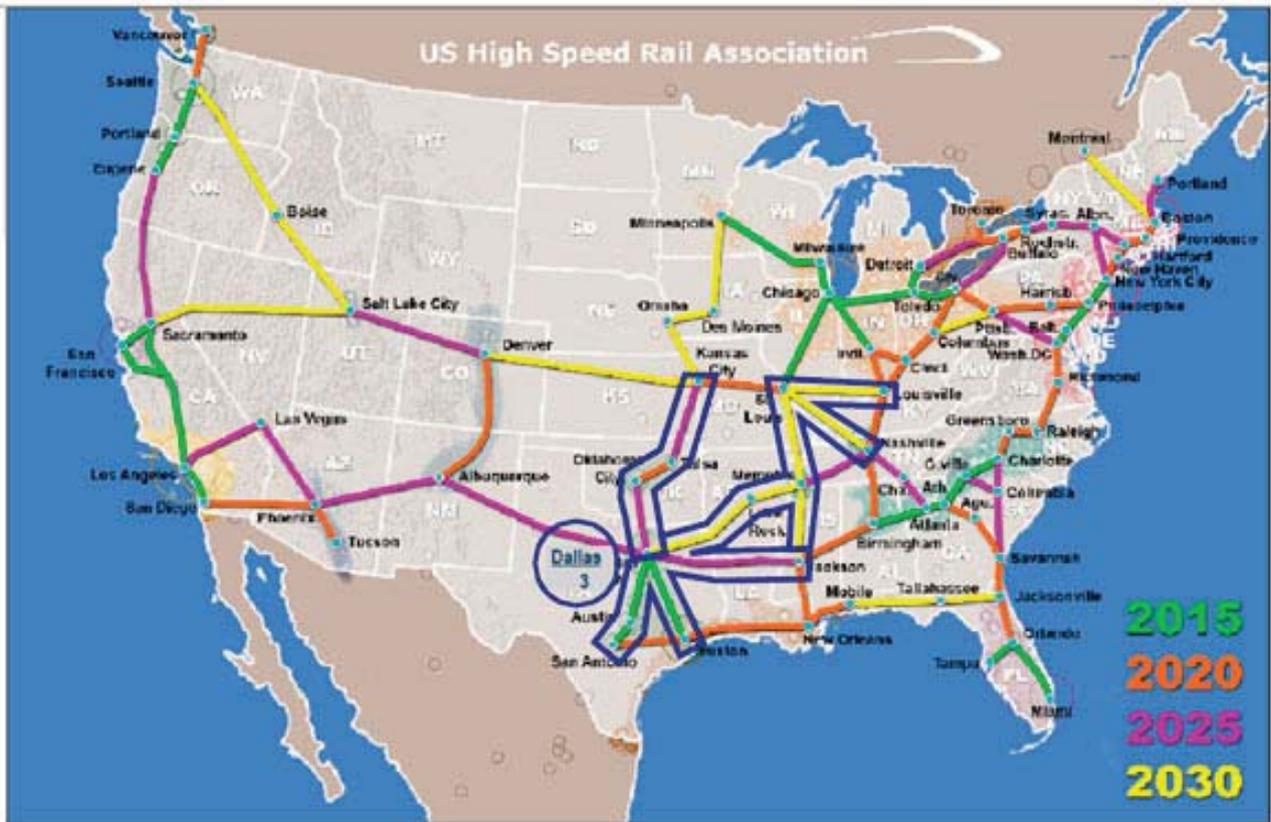
Figura/e 1c.-. Trayecto Intercoastas, con los Polos de actuación para su construcción / Intercoastas way, with Work Poles for its construction



Figura/e 2.1



Figura/e 2.2



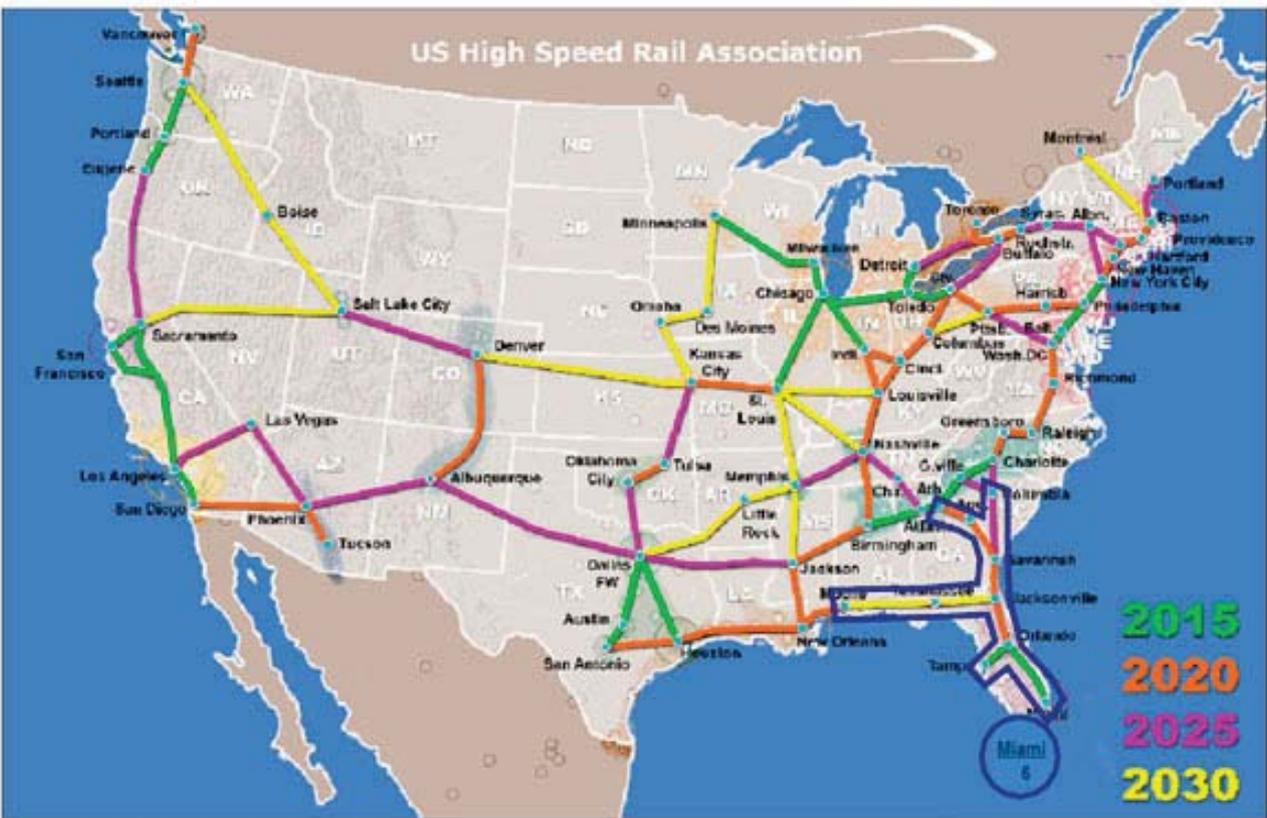
Figura/e 3.3 (P3 Dallas)



Figura/e 3.4 (P4 Chicago)



Figura/e 3.5 (P5 Atlanta)



Figura/e 3.6 (P6 Miami)



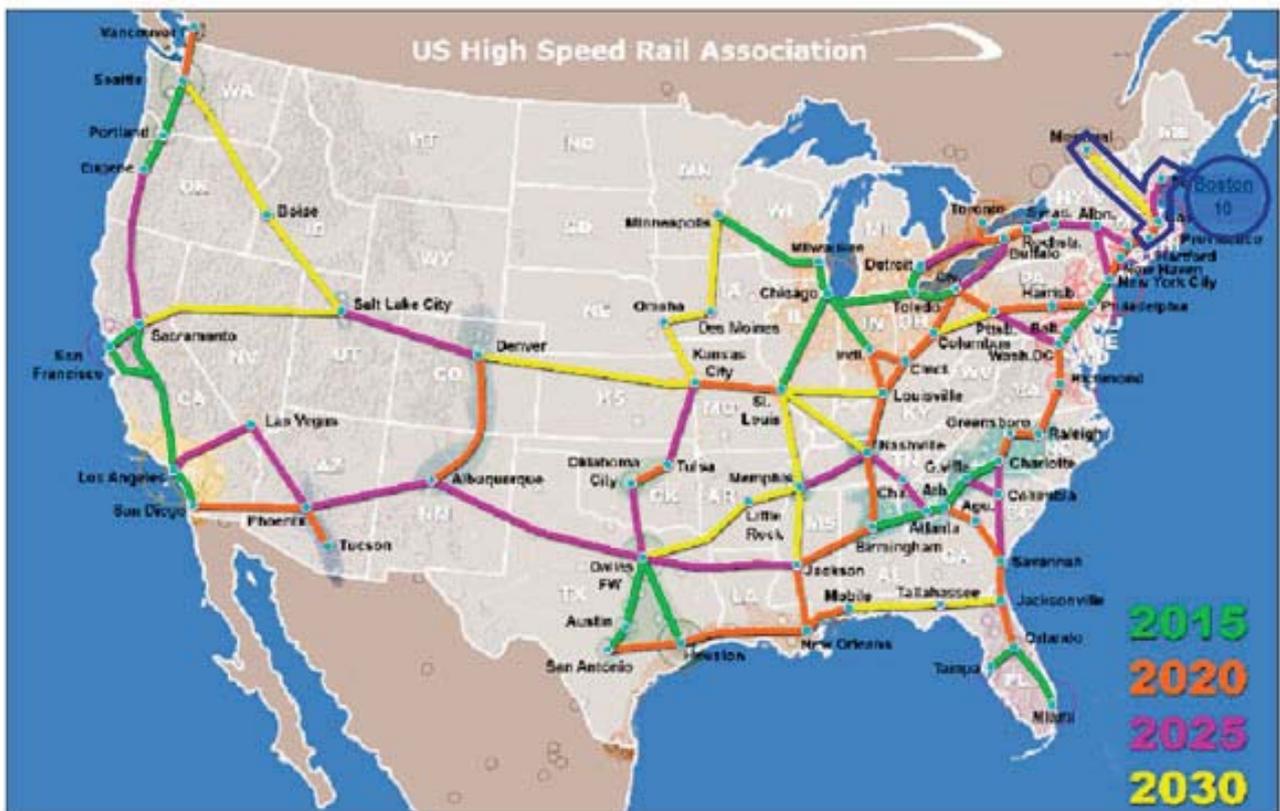
Figura/e 3.7 (P7 New York)



Figura/e 3.8 (P8 Denver)



Figura/e 3.9 (P9 Pittsburgh)



Figura/e 3.10 (P10 Boston)

**Tabla/e 4: USHSR Proposal of investments allocation by Work Poles /
 Propuesta de asignación de fondos por Polos de actuación**

<u>Pole nb/ City</u>	<u>Etape 1</u>	<u>Etape 2</u>	<u>Etape 3</u>	<u>Etape 4</u>	<u>Total Plan</u>
1/San Francisco 70.000 M\$	25.500 M\$	13.000 M\$	10.000 M\$	21.500 M\$	21.500 M\$
2/Seattle 50.000 M\$	6.500 M\$	5.500 M\$	12.500 M\$	25.500 M\$	25.500 M\$
3/Dallas 80.000 M\$	9.000 M\$	20.000 M\$	17.000 M\$	34.000 M\$	34.000 M\$
4/Chicago 95.000 M\$	56.500 M\$	21.500 M\$	17.000 M\$	-----	-----
5/Atlanta 50.000 M\$	16.000 M\$	13.500 M\$	20.500 M\$	-----	-----
6/Miami 45.000 M\$	10.000 M\$	16.500 M\$	4.500 M\$	14.000 M\$	14.000 M\$
7/New York 50.000 M\$	16.500 M\$	8.500 M\$	25.000 M\$	-----	-----
8/Denver 70.000 M\$	-----	9.500 M\$	31.000 M\$	29.500 M\$	29.500 M\$
9/Pittsburgh 60.000 M\$	-----	44.000 M\$	11.500 M\$	4.500 M\$	4.500 M\$
10/Boston 30.000 M\$	-----	8.000 M\$	6.000 M\$	16.000 M\$	16.000 M\$
Total System 600.000 M\$	140.000 M\$	160.000 M\$	155.000 M\$	145.000 M\$	145.000 M\$

US HSR NETWORK PHASING PLAN



Figura/e 4.-. HSR Work Poles Plan

4. Conclusiones

En este artículo se hace una propuesta de Plan inicial para el desarrollo de la USHSRS, con el objeto de promover la participación de empresas de ingeniería, construcción e instalaciones con experiencia en la realización de la Alta Velocidad Española (AVE), coordinadas y dirigidas por un operador y gestor ferroviario español, en el marco de una posible colaboración del Gobierno de España con el de Estados Unidos.

Las soluciones técnicas adoptadas en los Anteproyectos de los autores de este artículo registrados en el Colegio de Ingenieros de Caminos de Madrid: "HSRL Fresno-San Francisco Airport" (Ref 146304), "Proyecto Farwest" (Ref 148397) y "Proyecto Canevar" (Ref 149458), están basadas en los requerimientos de máxima seguridad para los pasajeros, de respeto al medio ambiente y de explotación financieramente rentable y sostenible que harían posible la realización más importante de ingeniería civil del mundo de los próximos años.

Referencias

- [1] Kunz, Andy (2009) “America’s transportation future: steel Wheel, high speed rail” ENR (Engineering New Records) magazine, August 10th 2009 Washington, USA.
- [2] Rochet, Pierre-Louis (2010) “La grande vitesse ferroviaire dans le monde” Revue Générale des Chemins de Fer Mars 2010 Paris, France.
- [3] Pérez, Antonio (2011) “Talgo aporta su tecnología innovadora al desarrollo de Alta Velocidad en EE.UU” Revista Tecnrail, Febrero 2011 Madrid, Spain.
- [4] Szabo, Joseph C (2011) “El surgimiento de Alta Velocidad en EE.UU” Revista Tecnrail, Febrero 2011 Madrid, Spain.
- [5] López Pita, Andrés (2011) “Alta Velocidad en el Ferrocarril” Madrid, Spain.
- [6] Audikana, Ander (2012) “Pasado, presente y future de la Alta Velocidad en Estados Unidos” Revista de Obras Públicas nº 3538, Diciembre 2012 Madrid, Spain.

Red de alta velocidad de EE.UU. (USHSRS) Trayecto intercostas Sas Francisco-Washington D.C. (Lado Pacífico)

The U.S. high speed railway (USHSRS) Intercoasts way San Francisco-Washington D.C. (Pacific Side)

Luis Fort López-Tello*

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dr. Ingeniero Agrónomo. Jubilado de los Cuerpos de Ingenieros de Caminos del Estado y de Profesores Titulares de Universidad. Madrid.

Carmen Fort Santa-María*

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. DEA en Ingeniería del Terreno. Eptisa, S.I. División de Infraestructura del Transporte. Madrid

Resumen

El trayecto “intercostas” San Francisco Airport-Washington D.C. ofrece, aún formando parte de la red general del Plan de Alta Velocidad de Estados Unidos, una singularidad de explotación federal de la misma, vertebrándola y permitiendo un adelanto progresivo de la comunicación entre los diferentes Estados de USA. **Una primera parte**, siguiendo la división fisiográfica de su territorio de Oeste a Este, corresponde a la vertiente Pacífico, desde sus costas en California hasta los altiplanos de las Rocosas. Esta primera parte del trayecto **lo forman las líneas San Francisco Airport- Sacramento Roseville** (Alternativa “Crossing Bay” del Proyecto Farwest); **Sacramento Roseville- Reno/Carson** (“Tahoe Line” del Proyecto Canevar) y **Reno- Salt Lake City** (“Great Basin Line”, que se describe en este artículo).

Se recopila al final un resumen de figuras características y de costes de construcción, así como una propuesta de explotación y de financiación de esta primera parte “Lado Pacífico” del trayecto intercostas.

Palabras clave: Alta Velocidad, Estados Unidos, Intercostas, Tahoe, Bonneville, Salt Lake.

Abstract

*The “intercoasts” way San Francisco Airport- Washington D.C. belong to the general system of the High Speed Railway of the U.S.A., but it presents a singularity of federal exploitation, that hold it up allowing an progressive advance of the USA interstate communication. **A first part**, according to the physiographic division of its territory, from West to East, concerns to the Pacific side, from the pacific coasts in California till the tablelands of the Rocky Mountains. This railway is formed by the lines **San Francisco Airport- Sacramento Roseville** (“Crossing Bay Alternative” of the Farwest Project); **Sacramento Roseville – Reno/Carson** (“Tahoe Line” of the Canevar Project) and **Reno-Salt Lake City** (“Great Basin Line”) that is described in this article.*

Finally it's compiled a summary of characteristic figures, construction budget and a proposal of exploitation and financing of this first part “Pacific side” of the intercoasts railway.

keywords: High-Speed, United States, Intercostas, Tahoe, Bonneville, Salt Lakes.

1. Introducción

El trayecto intercostas San Francisco (Costa Pacífico)- Washington D.C. (Costa Atlántico) de la USHSRS, con más de 4.000 Km de recorrido, atraviesa los Estados Unidos de Norteamérica de Oeste a Este, partiendo *de la Terminal HSR de San Francisco Airport en el Estado de California*, con unas coordenadas geográficas aproximadas de 37,5° de latitud N, 122,5° de longitud W y 16m de altitud, para llegar *a la Terminal HSR de Washington en el Distrito de Columbia* (cedido por los Estados de Virginia y Maryland), aproximadamente a 39° N de latitud, 79°N de longitud y 22m de altitud.

Atraviesa los Estados de California, Nevada (horario “Pacific Time”), Utah, Colorado (horario “Mountain Time”), Kansas, Missouri, Kentucky (horario “Central Time”), Kentucky, Ohio y Pennsylvania (horario “Eastern Time”), manteniéndose entre latitudes de 37,5°N (California) y 41°N (Utah) y altitudes de 6m en Sacramento (California) y 1.591m en Denver (Colorado). La temperatura media del mes de Enero va de -2,6°C en Salt Lake City (Utah) a 10,2°C en San Francisco (California) y la del mes de Julio de 14,7°C en San Francisco (California) a 27,2°C en Kansas City (Kansas). La Precipitación media anual va desde 182mm en Reno (Nevada) a 1036mm en Washington D.C.

Una vez alcanzada la ciudad de Sacramento en el Proyecto Farwest, que desarrolla la red de alta velocidad ferroviaria del Estado de California y *la North Connection del Proyecto Canevar*, que contempla la prolongación de dicha red, desde su Terminal Norte en Sacramento Roseville hasta la ciudad de Reno en Nevada y su ramal de acceso a Carson City, capital del Estado, *queda iniciado el trayecto intercostas en sus primeros 372 Km.*

El tramo siguiente de este trayecto, todavía dentro de la “vertiente Pacífico”, permite conectar la capital de Utah, **Salt Lake City**, con las ya comunicadas entre sí por medio de la “*North Connection*” del Proyecto *Canevar* de los Estados de California y Nevada, **Sacramento** y **Carson City**. Con una longitud de 680 Km y con su trazado atravesando el *Great Basin*, constituye la “**Great Basin Line**”, **Reno-Salt Lake City**.

De esta forma se puede considerar el Proyecto “**Intercoasts Way I: Pacific Side**” (Figura 1) de 1.052 Km (684 mile), constituido por las tres Líneas:

“Crossing Bay Alternative”: **San Francisco Airport- Sacramento Roseville**, línea estatal (California) de 167 Km, integrada a su vez en el Proyecto Farwest, totalmente dentro de la California High- Speed Railway System;

“Tahoe Line”: **Sacramento Roseville- Reno/Carson City**, línea interestatal (Estados de California y Nevada) de la U.S. High-Speed Railway System, de 205Km, y

“Great Basin Line”: **Reno-Salt Lake City**, Línea también interestatal (Estados de Nevada y Utah) de la U.S.H.S.R.S., de 680 Km.

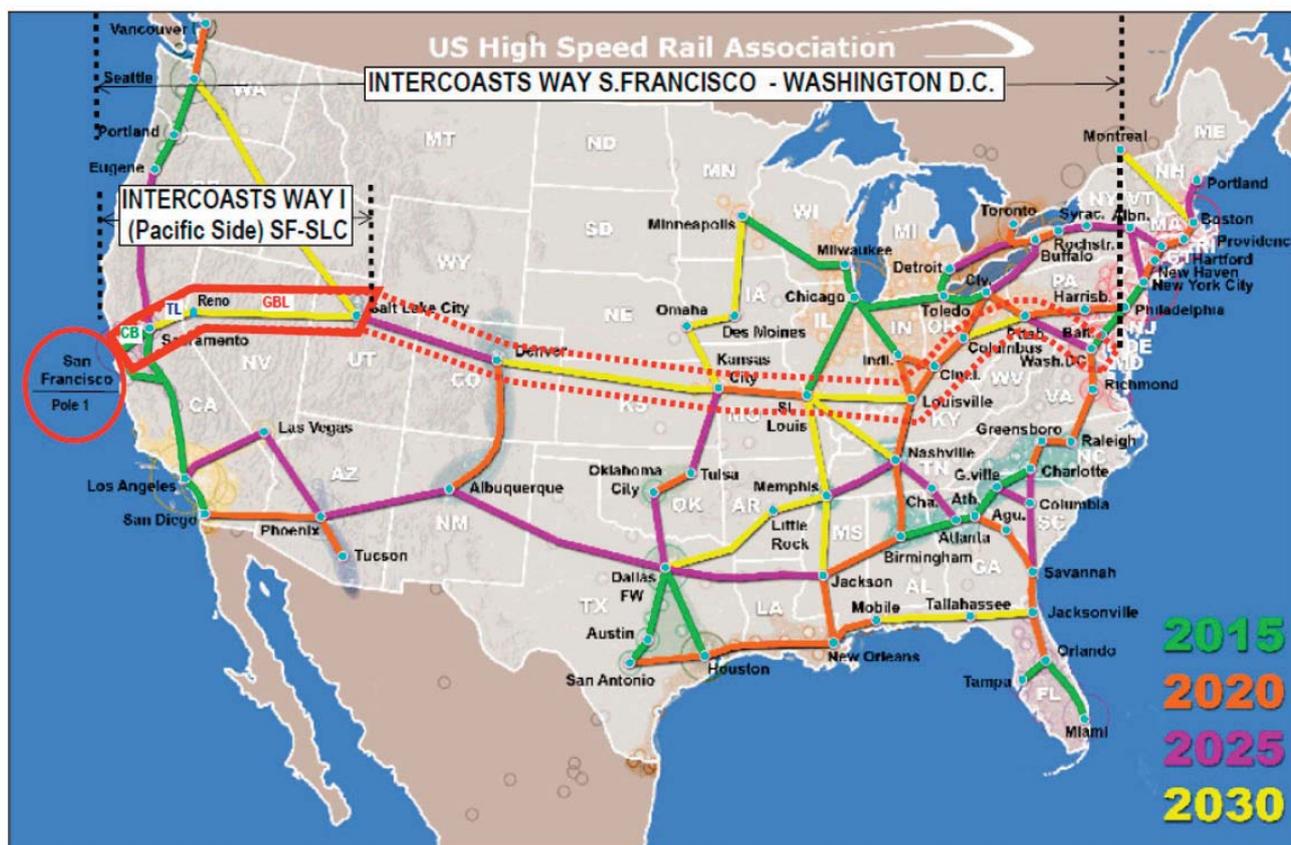


Figura 1. Intercoasts Way I: Pacific Side

2. Descripción del proyecto “INTERCOSTAS WAY I: Pacific Side”

En la tabla Resumen (Tabla 1) se desglosa por líneas las figuras características, morfológicas, constructivas y económicas de este proyecto. Puede destacarse de forma global que este Proyecto requiere la construcción de 1052 Km (654 mile) de plataforma de vía, de los cuales 194 Km en túnel (diez “long tunnels”), 63 Km en viaducto (cinco puentes colgantes múltiples, con 26 Km de longitud) y 795 Km a cielo abierto (960 Mm³ de movimiento de tierras más 27 Mm³ de excavación en túneles). La explotación de la sección Pacífico de este trayecto intercostas, en condiciones de seguridad y adecuado servicio se proyecta hacerla con siete estaciones (cuatro grandes terminales) y diecisiete puntos de adelantamiento y estacionamiento de trenes (PAETs/TSAPs).

Este Proyecto supone una inversión total de 27.402 M\$, con un coste unitario de 26,05 M\$/Km, ligeramente superior al de eficiencia FOM (coste que el Ministerio de Fomento del Gobierno de España aprobó en 2010 para la ejecución de obras públicas de infraestructuras ferroviarias de alta velocidad), que en condiciones medias aplicables por analogía, sería de 23,88 M\$/Km.

El coste total imputable a cada uno de los tres estados por los que discurre esta infraestructura interestatal, es de 10.200 M\$ (297 Km) a California (37,22%), 12.875 M\$ (575Km) a Nevada (46,99%) y 4.327 M\$ (180 Km) a Utah (15,79%).

En el Proyecto Farwest, se prevé la construcción de la línea San Francisco Airport-Sacramento Roseville, en la “Crossing Bay Alternative” en un plazo de ocho años (7 al 15 del California High Speed Train Program CHSTP) con un coste de 6.910 M\$.

En el Proyecto Canevar, la línea “Tahoe Line” de la “North Connection” que enlaza las capitales de California y Nevada se puede construir en un plazo de siete años, por lo que para coordinar la explotación de este trayecto con la incorporación del gran foco de población que es el área de la Bahía de San Francisco, esta línea debería acometerse de forma inmediata en el ramal Reno-Carson y desde Reno y Sacramento para completarla para el año 7 del CHSTP. El coste previsto de esta línea es de 6.806 M\$, de los cuales 3.516 M\$ (2.110 M\$ para el ramal a Carson) imputables al Estado de Nevada y 3.290 M\$ al Estado de California.

Para hacer operativa la Sección “Pacífico” del Trayecto Intercostas en el plazo de quince años, se propone la construcción de la línea “Great Basin Line” Reno-Salt Lake City en ese plazo (1 al 15 del CHSTP), con actividad constructiva simultánea en los Estados de Nevada y de Utah. Dada la dificultad del trazado en el Estado de Utah al atravesar el **Great Salt Lake** por la posibilidad de licuefacción de los sedimentos modernos de este lago sobre los más antiguos consolidados del **Bonneville Lake** ante sismos probables de magnitud $\geq 7,5$, relacionados con las principales fallas de la parte sur del Great Salt Lake, “Antelope Island Fault”, “East Lake Fault” y “Carrington Island Fault”, podría ser aplicable un diagrama espacio-tiempo como el esquematizado en la Figura 2.

Tabla 1. Summary of the: Intercostas Line (Pacific Side)

		Farwest Project		Canevar Project		Intercostas Project		USHRSR	
Units	Sections Items Charac.	"Crossing Bay Alternative"		"Tahoe Line"		"Great Basin Line"		Intercostas Way (Phase I)	
		San Francisco Airport-Sacramento Roseville		Sacramento Roseville - Reno/Carson		Reno-Salt Lake City		Pacific Side (S Fco-S L City)	
Km	Total Length Section	167,0	(104mile)	205,0	(127mile)	680,0	(423mile)	1.052	(654mile)
Km (%)	Length of Cut & Fill areas	84,0	(50,30%)	141,0	(68,78%)	570,0	(83,82%)	795	(75,57%)
Km (%)	Overall Length of Tunnels	61,0	36,53%	60,0	(29,27%)	73,0	(10,74%)	194	(18,44%)
Km (%)	Overall Length of Viaducs	22,0	(13,17%)	4,0	(1,95%)	37,0	(5,44%)	63	(5,99%)
Internal Station	Localisation of Int.Station	VALLEJO		CARSON CITY		BONNEVILLE (TSAP)		VALLEJO-CARSON-BONNEVILLE	
Number (E/S/Int)	TSAP/PIB (PAET/BIP) / (Line + Station)	8	(6+2)	6	(4+2)	8	(7+1)	22	(17+5)
Km/h	Average Speed	295		284		315		306	
Mm ²	Earth Moving (Overall section)	60,26		495,19		431,50		986,95	
Mm ²	from excavation	2,43		319,81		9,95		338,38	
Mm ²	from fill	49,21		87,69		267,23		404,13	
Mm ²	from tunnels	8,62		8,27		9,95		26,84	
Mm ²	after compensate (except specifics)	-38,16		319,81		-102,96		178,69	
Mm ²	Deficit (-)	-46,78		0,00		-112,91		-159,69	
Mm ²	Excess to dump (+)	8,62		319,81		9,95		338,38	
Number	Overall tunnels by section	13		5		6		23	
nb (Km)	Long tunnels (≥ 6 Km)	4 (24)		4 (56,50)		2 (70,00)		10 (151,24)	
nb (Km)	Shorts tunnels (≤ 1,25 Km)	-		-		-		4 / 6	
Km	Length of long tunnels	14/13/6,7/6		16/15,5/12,5/12,5		35/35		35(2)/16/15,5/14/13/12,5(2)/6,7/6	
m ²	Construction works (Overall)	335.770		108.550		619700		1.064.020	
nb	Viaducs	12		5		12		29	
nb-m ²	Others Bridges	31	34.250	33	24.150	66,0	64.650,0	130	123.050
nb-Km	Suspension (800 m span) bridges	3	12,88	1	1,60	1	11,20	5	25,68
M\$	Construction budget (A+B+C+D+E+F+G)	6.910		6.806		13686		27.402	
M\$	Earth moving (a)	883		2860		5072		8.815	
M\$	Tunnels (b)	2372		2139		2549		7.060	
M\$	Construction works (c)	2328		257		1784		4.369	
M\$	A - Infrastructure (a+b+c)	5583		5256		9405		20.244	
M\$	B - Overstructure	356		463		1485		2.304	
M\$	C - Equipments	426		594		1971		2.991	
M\$	D - Environmental Protection	113		113		227		453	
M\$	E - Design, Q/C, Management.	162		162		327		651	
M\$/Km	F - Supplemet Construction budget by Stations & Building TSAP	270		218		271		759	
M\$/Km	Unit cost (included Stations)	41,38		33,20		20,13		26,05	
M\$/Km	Unit efficiency Cost (FOM Ministry Spain Ref.2010)	33,80		29,88		19,63		23,88	
FOM M\$/Km	Relief-Type-Nature	VS-2-Mari/Urb		VS-2-Ru/sUrb		W-2-Ru		VS/W-2-Mari/Ru/Urb	
M\$/State	State Imputed Cost	6.910 CALIFORNIA		3.290 CALIFORNIA 3.516 NEVADA		9.359 NEVADA 4.327 UTAH		10.200 CALIFORNIA 12.875 NEVADA 4.327 UTAH	

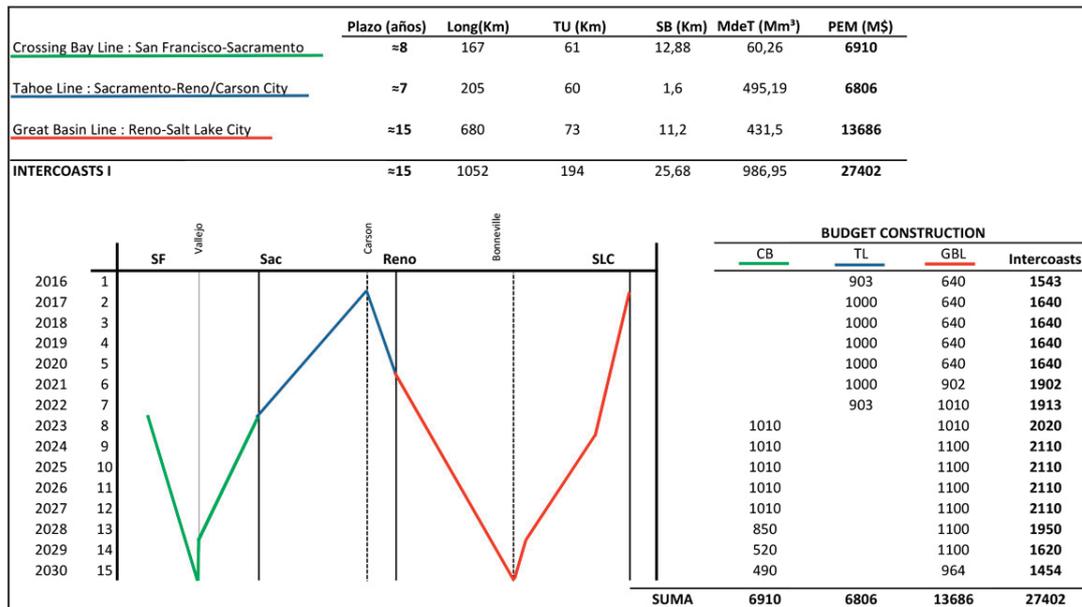


Figura 2. Programación Valorada Espacios-Tiempo del Proyecto Intercoasts I (Pacífico Side)

La necesidad de fondos federales para este Proyecto, no teniendo en cuenta la línea San Francisco-Sacramento por haber sido considerada en la financiación del Proyecto Farwest de la CHSR ni el ramal de acceso a Carson City desde Reno, por interés propio del Estado de Nevada, es de 18.382 M\$ (incluyendo la parte proporcional de la estación de Reno), lo que supone un coste para los 840 Km interestatales de 21,88 M\$/Km. Corresponden 3.290 M\$ a California, 10.765 M\$ a Nevada y 4.327 M\$ a Utah, que según la programación representada en la Figura.2, supondría el siguiente cronograma de necesidad de asignación de fondos federales por líneas y por Estados (Tablas 2a y 2b).

Tabla 2a. Financiación con fondos federales de las líneas interestatales I (TL) y (GBL) en M\$

Años calendario	Años CHSTP	Sacramento-Reno/Carson		Reno - Salt Lake City	
		TAHOE	LINE (TL)	GREAT BASIN LINE (GBL)	
		California	Nevada*	Nevada	Utah
2016	1	436	467 (187)	438	202
2017	2	483	517 (207)	438	202
2018	3	483	517 (207)	438	202
2019	4	483	517 (207)	438	202
2020	5	483	517 (207)	438	202
2021	6	483	517 (207)	617	285
2022	7	439	464 (184)	691	319
2023	8			752	319
2024	9			752	348
2025	10			752	348
2026	11			752	348
2027	12			752	348
2028	13			752	348
2029	14			752	348
2030	15			658	306
SUMA		3290	3516 (1406)	9359	4327

* Financiación del Ramal a Carson: 45 km (45/75)*3516=2110 M\$ con fondos estatales o locales

Tabla 2a. Financiación con fondos federales (forthcoming)* del proyecto INTERCOASTS I (Pacific side) en M\$

Años\Estados	CALIFORNIA	NEVADA	UTAH	INTERCOASTS I (Pacific Side)
2016	436	625	202	1263
2017	483	645	202	1330
2018	483	645	202	1330
2019	483	645	202	1330
2020	483	645	202	1330
2021	483	824	285	1592
2022	483	875	319	1633
2023	439	691	319	1010
2024		752	348	1100
2025		752	348	1100
2026		752	348	1100
2027		752	348	1100
2028		752	348	1100
2029		752	348	1100
2030		658	306	964
SUMA	3290	10765	4327	18382

* La Línea San Francisco-Sacramento “Crossing Bay Alternative” (CB): 6910 M\$ financiados en la CHSRS

3. Reseña descriptiva de las líneas del proyecto “INTERCOASTS I : Pacific Side”

3.1. Línea HSR San Francisco Airport_Sacramento Roseville

(Descripción tomada del Proyecto Farwest “Bay Crossing Alternative”)

Introducción

El Proyecto FARWEST plantea como hito final para culminar la red de alta velocidad ferroviaria del Estado de California (CHSRS), según la previsión del Plan federal de alta velocidad ferroviaria de Estados Unidos (USHSRS), la construcción de la LAV San Francisco Airport – Sacramento Roseville, cruzando la Bahía de San Francisco (“Bay Crossing Alternative”).

Descripción de la línea HSR San Francisco-Sacramento “BAY CROSSING ALTERNATIVE”

A. Trayecto urbano en San Francisco

La alternativa “Golden Gate” de la línea Fresno – San Francisco termina en la HSR San Francisco Airport Station, situada en una parcela de forma triangular entre la Hwy 101 Bay Shore y la Huntington Avenue en San Bruno, junto al Aeropuerto Internacional de San Francisco (Figura3). La nueva línea se inicia en esta estación (pk≈272+100) y llega en este trayecto hasta la costa norte de la península de San Francisco, en las proximidades del simbólico puente colgante Golden Gate, muy cerca del nudo que enlaza la Hwy 101 con la interestatal 1 (Veterans Boulevard) a la salida del túnel General Douglas Mac Arthur (Figura4).

Es un tramo urbano, gran parte en túnel, conectando con otras redes de transporte, principalmente la MUNI, en la SAN FRANCISCO Forest Hill MO Station en Midtown Terrace, para el servicio de cercanías del área de la bahía (Figura 4). Pasa en túnel bajo los “Golden Gate Park” y “Presidio Golf Course”, para salir a superficie a la cota 40 en el pk 292+100, después de pasar bajo la 101 DOYLE DRIVE (Figura 4).

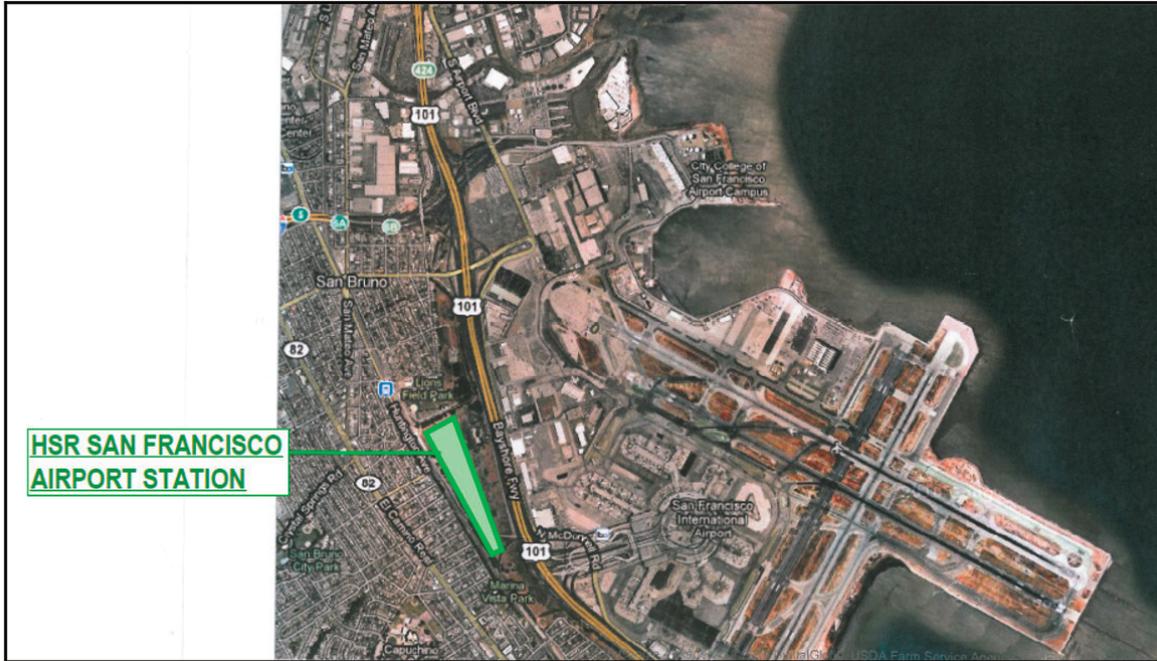


Figura 3. HSR San Francisco Airport Terminal Station



Figura 4. Línea HSR “BCA” Trayecto urbano en San Francisco

El inicio del tramo se hace soterrando la traza y con un viaducto urbano, para entrar a continuación en túnel (TU 1, de 4,2 Km), desde la estación también subterránea de San Francisco Airport, bajo DALY CITY, en la zona de San Bruno (Figura 5). Atraviesa San Bruno Mountain State & County Park, para salir a superficie un pequeño tramo, una vez cruzada la Bay Area Rapid Transit Line (BART), la Hwy 280 (John F. Foran Fwy) y la San José Avenue con la MUNI METRO M .



Figura 5a. Planta Geológica Línea HSR “BCA” Trayectos San Francisco urbano y cruce de la Bahía

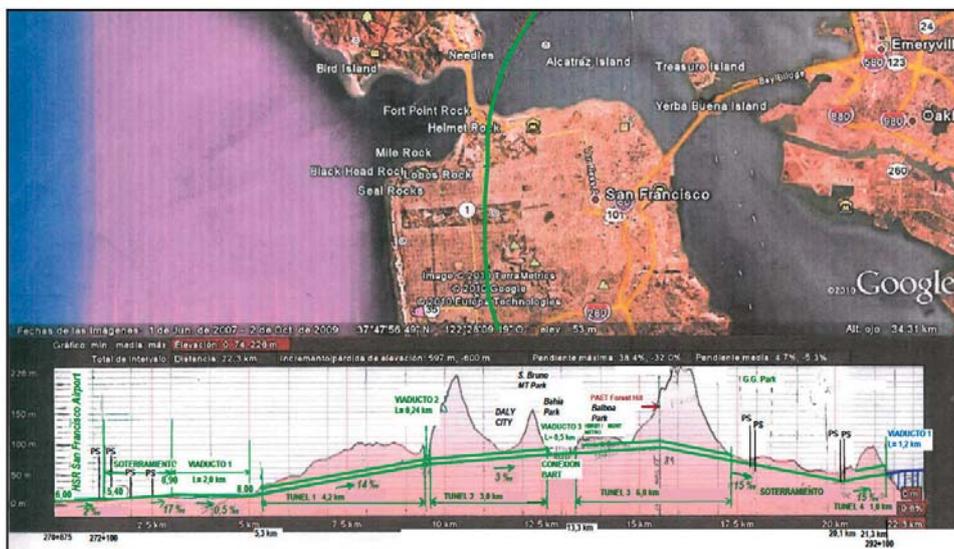


Figura 5b. Perfil Trayecto urbano “San Francisco Line HSR “BCA”

Tras un tramo deprimido, a cielo abierto por motivos de seguridad y rescate, entra de nuevo en túnel (TU 2, de 3 Km) bajo el City College of San Francisco, Phelan Avenue, Monterey Boulevard, Mount Davidson Park Portola Drive, Miraloma Park y Estación HSR de San Francisco, conectada con la estación MUNI Metro de Forest Hill en Midtown Terrace, y haciendo servicio de PAET anterior al cruce de la Bahía.

El trazado continúa bajo Clarendon Avenue, bordeando por el Este Laguna Honda Reservoir, bajo Warren Drive y Parnassus Avenue en la alineación de la 5th Avenue, por donde continúa a cielo abierto hasta Lincoln Way, donde radica la entrada del túnel TU 3, de 6,75 Km, que atraviesa Golden Gate Park en amplias curva y contracurva para cambiar de alineación a la de la 6th Avenue, por donde continúa en túnel artificial (cut & cover), con un tramo a cielo abierto, también por motivos de seguridad, evacuación en su parte final (por Lake Street West Pacific Avenue).

Otro túnel (TU 4, de 6 Km) pasa en el distrito “Presidio of San Francisco” bajo el Golf Course, Boulevard Lincoln y 101 Doyle Drive, hasta salir a superficie, por su boca norte (Portal Bahía), como se ha comentado anteriormente, en el arranque del Viaducto 1 que da origen al segundo trayecto de esta línea (Figuras 4 y 5).

B. Trayecto San Francisco – Richmond (Cruce de la Bahía)

La construcción de este trayecto representa la obra de ingeniería más importante y de marco más espectacular de todas las redes de transporte de California y particularmente de la alta velocidad ferroviaria CHSRs.

En el cruce de la Bahía por la línea de alta velocidad San Francisco – Sacramento, se pueden distinguir las siguientes unidades morfológicas y estructurales (Figuras 6 y 7).

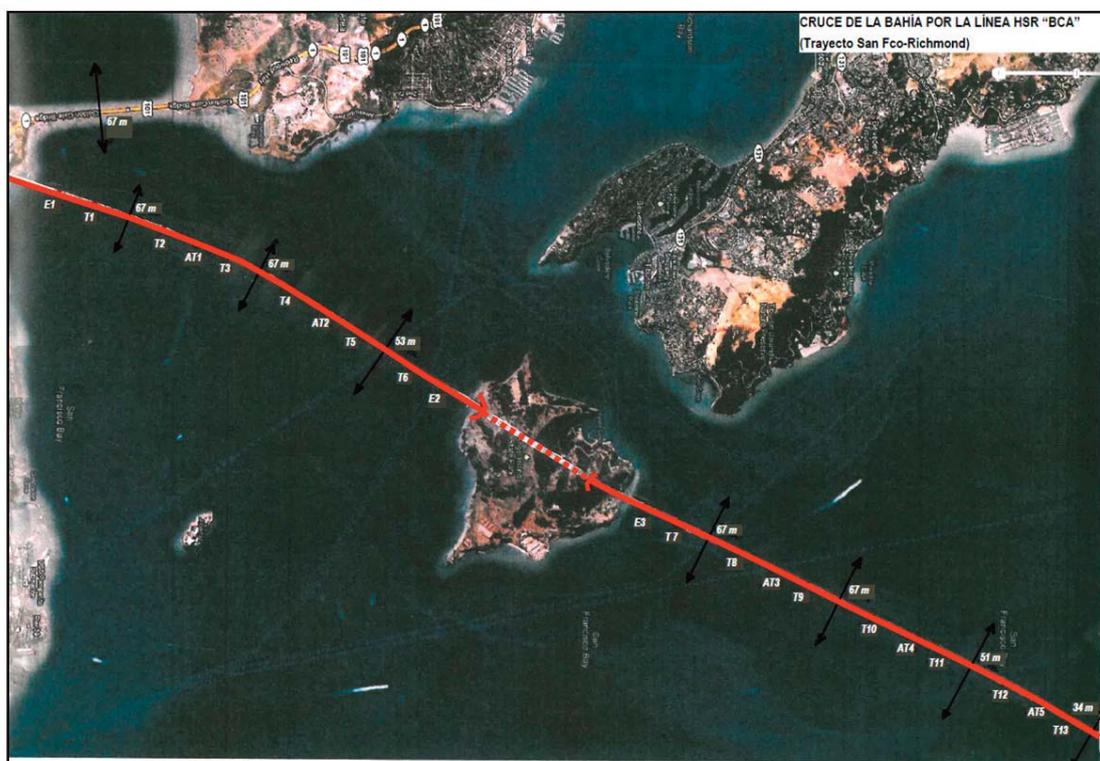


Figura 6a. Cruce de la Bahía por la Línea HSR “BCA”, Trayecto San Francisco-Richmond

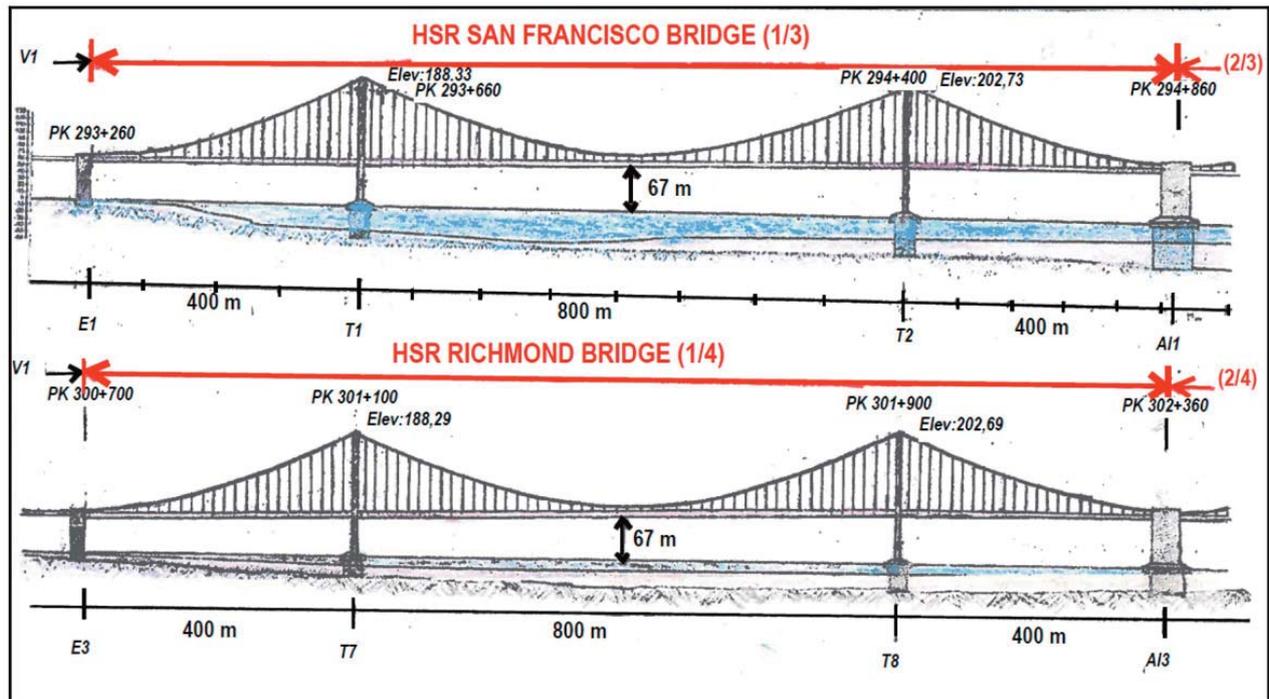


Figura 6b. Alzados parciales de los Puentes Colgantes del Cruce de la Bahía por la Línea HSR “BCA” (Trayecto San Francisco-Richmond)

1 - PASO 1 DE LA BAHIA

- 1.1. VIADUCTO 1 “ACCESO SAN FRANCISCO PRESIDIO” L= 1.100m (pk 292+140 a 293+240)
 - 11 Vanos de tramo recto, de 100m de luz
 - Planta curva centro derecha de gran radio
 - Rasante en rampa de +18milésimas. Cotas rasante: EA 40,97m E11 60,77m
- 1.2. PUENTE COLGANTE MÚLTIPLE “HSR SAN FRANCISCO” L=4.800m (pk 293+260 a 298+060)
 - 3 Puentes colgantes de tres vanos (400-800-400) alineados, con anclaje común entre cada dos
 - Planta curva transición –recta-transición inversa
 - Rasante en rampa de +18 milésimas (1.600m)/ en pendiente de -18milésimas(3.200m)
 - Cotas rasante: E12 61,13m E21 46,73m
 - Gálibo de navegación en centro de vanos: T1-T2 67m T3-T4 67m T5-T6 53m
- 1.3. VIADUCTO 2 “ACCESO SUR ANGEL ISLAND” L= 500m (pk 298+080 a 298+580)
 - 5 Vanos de tramo recto de 100m de luz
 - Planta curva centro izquierda de gran radio
 - Rasante en pendiente de -18 milésimas Cotas de rasante: E22 46,37m EB 37,37m

2 — TUNEL “ANGEL ISLAND”

- Túnel excavado con TBM L=1.160m (pk 298+620 a 299+780)
- Planta en doble transición, con rasante en rampa de + 8 milésimas
- Portal Sur (298+620) Cota de rasante : 37,37m
- Portal Norte (299+780). Cota de rasante : 46,33m

3 – PASO 2 DE LA BAHÍA

3.1. VIADUCTO 3 “ACCESO NORTE ANGEL ISLAND” L= 800m (pk 299+880 a 300+680)

- 8 Vanos de 100m de tramo recto de 100m de luz
- Planta curva centro izquierda de gran radio
- Rasante en rampa de +18 milésimas. Cotas de rasante : EC 46,33m E31 60,73m

3.2. PUENTE COLGANTE MÚLTIPLE “HSR RICHMOND” L= 6.400m (300+700 a 307+100)

- 4 Puentes colgantes de tres vanos (400-800-400) alineados, con un anclaje común entre cada dos
- Planta curva transición – recta – recta – recta
- Rasante en rampa de +18 milésimas (1.600m)/ en pendiente de -11,6 milésimas (4.600m) Cotas de rasante : E32 61,09m E41 34,37m
- Gálibo en centro de vanos : T7-T8 67m T9-T10 67m T11-T12 51m T13-T14 34m

3.3. VIADUCTO 4 “ACCESO POINT RICHMOND” L= 400m (pk 307+120 a 307+520)

- 4 vanos de tramo recto de 100m de luz
- Planta recta
- Rasante en pendiente de -10,5 milésimas Cotas de rasante : E42 34,16m ED 29,92m

La longitud de este trayecto es de 15.480m, entre el portal Bahía del Túnel Presidio de San Francisco (pk 292+100) hasta el portal Bahía del Túnel artificial Point Richmond (307+580).El trayecto, según la descripción anterior, sería la conexión de mayor longitud sobre la Bahía. Morfológicamente, está constituida por las siguientes unidades:

- 11,28 km en puente colgante múltiple con vanos de 800m de luz principal
- 2,90 Km en viaductos de acceso, con vanos de tramo recto de 100m de luz
- 1,30 Km en túnel y trincheras de acceso al túnel en Angel Island

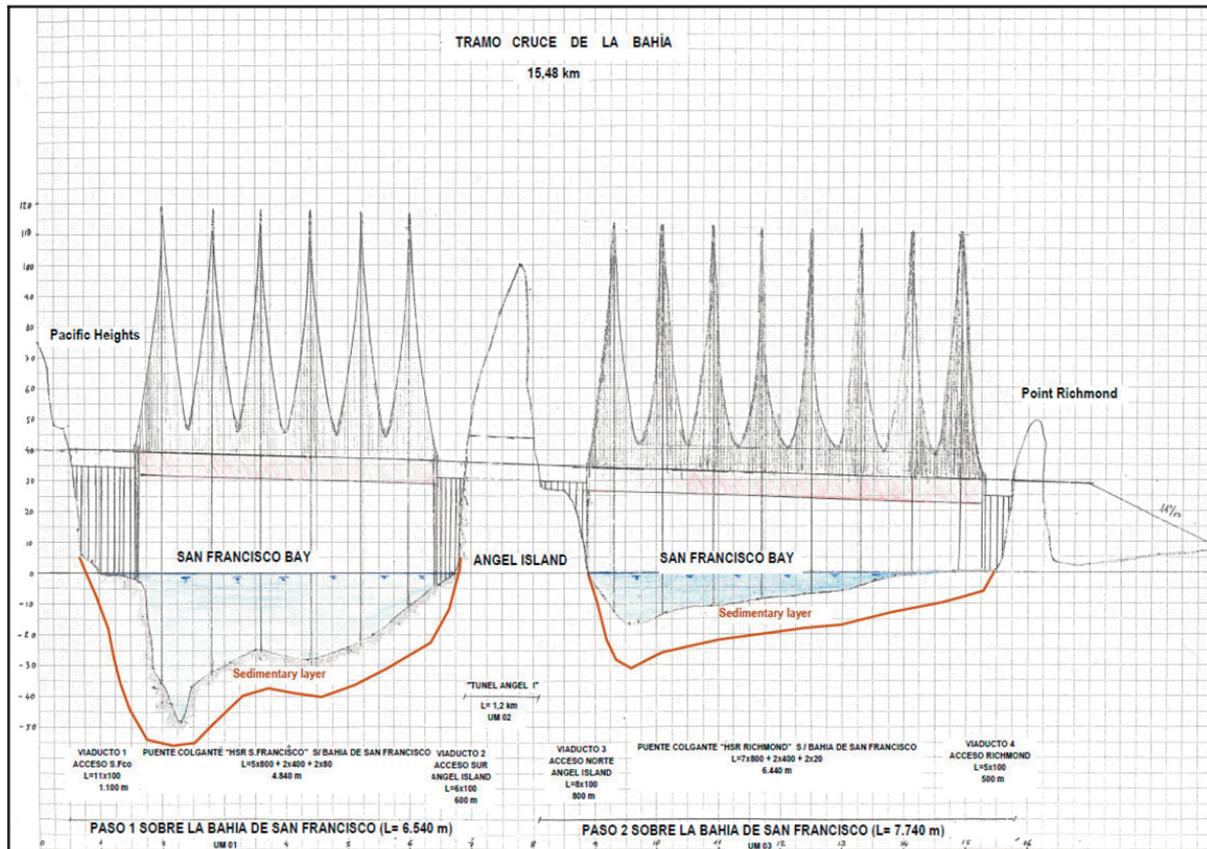


Figura 7. Perfil del fondo de la Bahía por el eje del trazado de la línea con espesor de sedimentos

C. Trayecto Richmond-Sacramento

A la salida del túnel artificial de Point Richmond (pK 307+580) el trazado pasa (Figura 8), en la zona de Richmond, bajo la 580 John T Knox Fwy y sigue, en terraplén, paralelo a Castro Street y al anejo parque de vías, hasta alinearse con la Richmond Pkwy por su margen oeste, para atravesar en túnel (TU1 de 6Km) la zona urbana de San Pablo, llegando a cruzar (una vez sobrepasada la San Pablo Avenue con el viaducto de tramo recto V1) la Bahía de San Pablo mediante un puente colgante de 1,6 Km y sus tramos de acceso (Viaducto V2), situado ligeramente al oeste del Estrecho de Carquínez, en Morrow Cove.



Figura 8. Paso por Richmond del Trazado de la Línea HSR “BCA” (Trayecto Richmond-Sacramento)

Seguidamente cruza la Hwy 80, para entrar en la HSR Station de Vallejo, cuya ubicación se propone, de forma parcial, sobre una parcela de forma trapecial sin edificar, próxima a la autopista. A continuación pasa en túnel de 13 Km (TU 2) por el extrarradio urbanizado de la ciudad de Vallejo, en la zona de Glen Clove, al noroeste de Benicia (Figura 9). Poco antes de cruzar Lake Herman Road continúa el trazado a cielo abierto, con terraplenes y desmontes de mediana altura, y túneles (TU 01, TU 3 y TU 02) en las proximidades de Fairfield.



Figura 9. Paso por Vallejo del Trazado de la Línea HSR “BCA” (Trayecto Richmond-Sacramento)

En este trayecto (Figura 10) se emplazan los PAETs de Rodeo (Richmond)(≈pK 330), Fairfield (≈pK 370) y Davis (≈pK 410). El PAET de Rodeo de este trayecto, junto con el PAET situado en la estación de San Francisco “Forest Hill” en el trayecto primero antes descrito (San Francisco urbano), se convierten en los centros de explotación del trayecto intermedio San Francisco- Richmond, que regulan desde el punto de vista de seguridad y estrategias de rescate en caso de accidente, el paso de la Bahía en sus viaductos de acceso, puentes colgantes y túneles (lado San Francisco, Angel Island y lado Richmond).

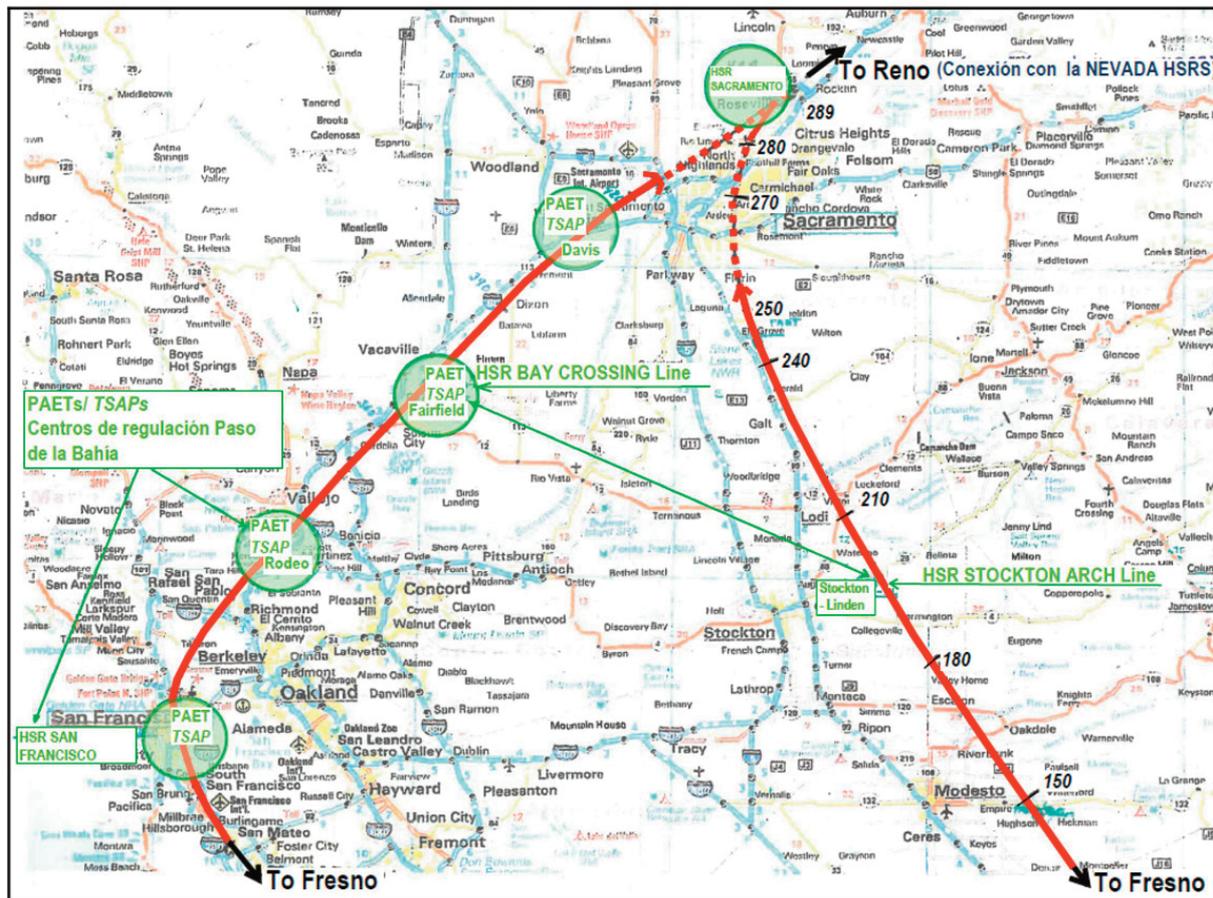


Figura 10. Localización de PAETs en la HSR “BCA” Line.

El PAET de Fairfield se comunica con el PAET de Stockton-Linden de la línea Fresno- Sacramento “Stockton Arch Alternative” por la carretera estatal 12, lo que puede contribuir a reforzar las medidas de evacuación en caso de necesidad o de bloqueo en la HSR o túneles de Sacramento.

Al llegar a la zona de West Sacramento, el trazado de la línea “Bay Crossing” pasa sobre el Sacramento River con un viaducto (V3), con arco de tablero intermedio de 200m de luz, y bajo la Hwy 5, en el túnel urbano de 14 Km de longitud (TU 03), construido con pantallas, y saliendo a cielo abierto después de atravesar North Highlands. A continuación y pasado Antelope, coincide en alineación (traza y rasante) con la línea HSR Fresno- Sacramento “Stockton Arch Alternative” en Roseville, donde se emplaza la gran terminal HSR Sacramento Roseville Station, cabecera de la futura línea HSR interestatal a Reno (Nevada) (Figura 11).



Figura 11. Coincidencia de las Líneas HSR “BCA” y HSR “SA” en la Terminal Station Sacramento Roseville

3.2 Línea U.S.H.S.R. Sacramento Roseville-Reno/Carson

(Descripción tomada del Proyecto Canevar)

Conexión redes HSR de los estados de California, Nevada y Arizona

Solución propuesta: CANEVAR CONNECTION (North & South) (Figura12)

North Connection

Se realiza la conexión Norte California-Nevada mediante la “**Tahoe Line**” que arrancando de la Terminal de Sacramento Roseville, comunica la capital del Estado de California con la ciudad de Reno en Nevada y con la capital del Estado de Nevada, Carson City, mediante un ramal de 45 Km/28 mi. De la estación de Reno, partirá la línea Reno-Salt Lake City, que extenderá la conexión de alta velocidad ferroviaria con el Estado de Utah.

Esta línea, de 205 Km de longitud (160 Km a Reno y 45 Km del ramal a Carson City), se desarrolla, como se detalla en la Tablas 3a y 3b, con 130 Km en California y 75 Km en Nevada.

Se proyectan 4 PAETs/TSAPs, localizados aproximadamente en pK 23 (**Auburn**), pK 62 (**Tahoe West**), pK114 (**Tahoe East**) y pK 186 (**Virginia City**), los tres primeros en California y el cuarto en Nevada, además de los situados en la HSR Station de Reno y en la Terminal HSR de Carson.

Se prediseña esta línea (Figura 13) con cinco túneles (dos “long tunnels” de 12,5 Km y otro de 3,5 Km en California y dos “long tunnels” de 15,5 Km y 16 Km en Nevada) y treinta y tres grandes estructuras de paso. Se considera necesaria la construcción de explanada para trenes VAL, como mínimo entre los pK 62 (PAET Tahoe West) y 160 (Estación de Reno).

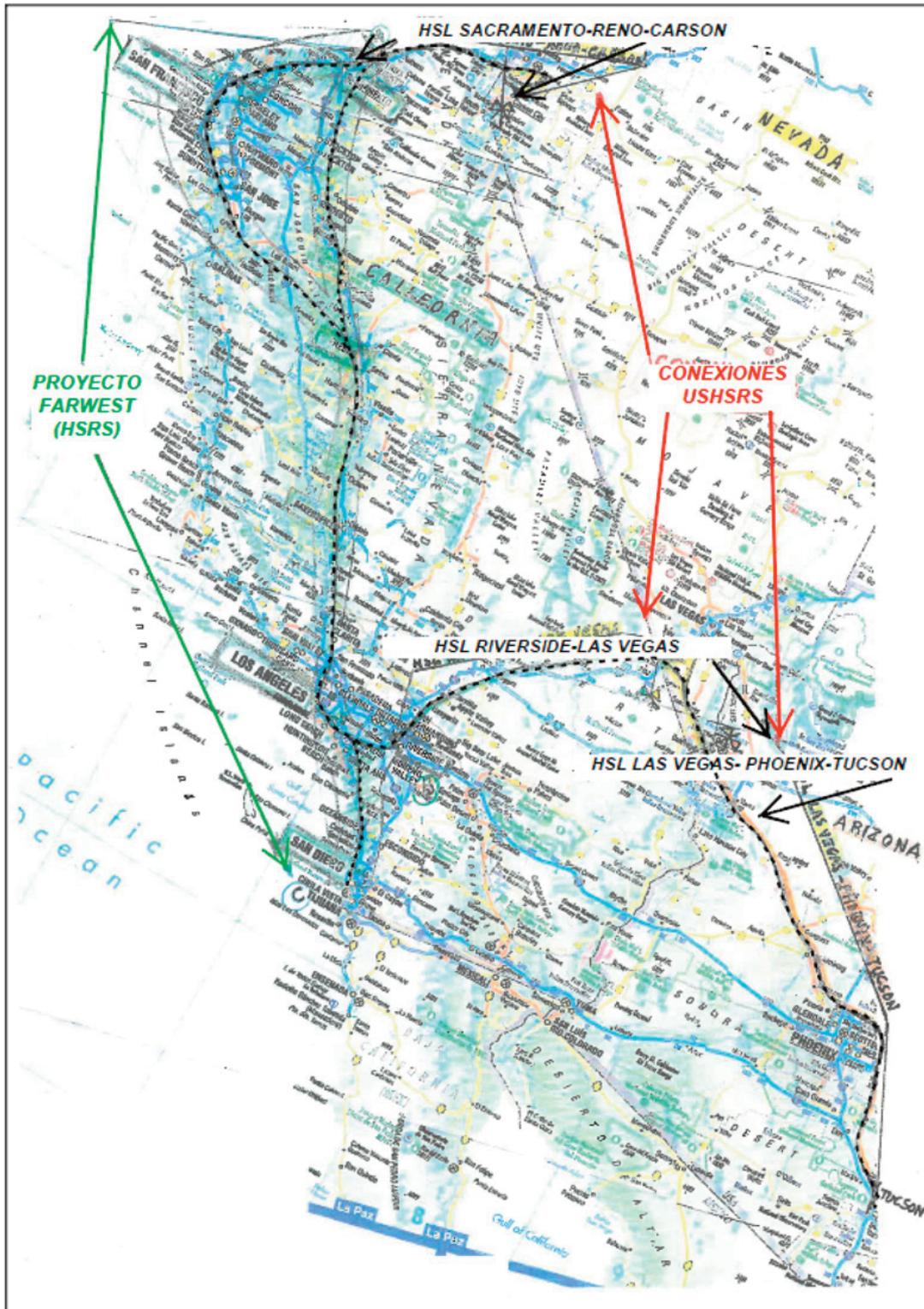


Figura 12. CONNECTIONS CHSRS-NEVADA/ARIZONA

Table 3a								
HSLs in CANEVAR PROJECT							Σ HSLCANEVAR CONNECTION	
	HSL "TAHOE LINE"	HSL "DESERT EXPRESS"	HSL "RIVERSIDE- PHOENIX"	HSL "MOUNTAINS LINE"	HSL "APACHE LINE"	North	South	
(Mi/Km) Total Length	127,5/205	204/328	426/685	270/435	115/185	127,5/205	606/975	
(Km)Tunnels total length	60,0	136,0	159,5	92,5	6,5	60,0	394,5	
Number TSAP/PAETs	4	5	10	3	4	4	22	
Number Tunnels	5	9	11	4	1	5	25	
Number Long tunnels	4	8	12	4	1	4	13	
(Km)Length Long tunnels	6-6,5-12,5-12,5	6-11,5-16-30-21,5-23-10,5-6,5	33,5-25-10,5-12-11,5-16-11,5-16-30-21,5-23-10,5	33,5-25-23,5-10,5	6,5	6-6,5-12,5-12,5	33,5-25-10,5-12-11,5-16-11,5-16-30-21,5-23-10,5-6,5	
Construction works	33	49	78	24	27	33	178	
Hwy cross	4	9	12	7	4	4	32	
Multilane cross	4	7	12	2	3	4	24	
Other roads cross	7	19	27	11	6	7	63	
Railway cross	9	4	4	1	1	9	10	
River bridges	9,0	10,0	23,0	3,0	13,0	9,0	49,0	
(\$/km) Unit cost	25,64	28,47	44,94	44,91	12,67	25,64	130,99	
(M\$) Line cost	5.256	4.705	8.749	9.922	2.345	5.256	25.721	
(M\$) Station cost	218	109	91	167	91	218	458	
(M\$) Total cost	5.474	4.814	8.840	10.089	2.436	5.474	26.179	
(Km/h) Commercial speed	277	612	919	590	313	277	2434	
Travel time	0h44m	1h05m	2h17m	1h29m	0h 35m	0h44m	3h17m	
(Millions/year) Travellers	4,1	8,7	18,7	8,2	10,7	4,1	46,4	
(Nb,p) TAV Trains	3(400)	3(400)	9(5*400+4*600)	6(2*400+4*600)	4(600)	3(400)	19(7*400+12*600)	
(nb,p) VAL trains	3(400)	3(400)	9(5*400+4*600)	6(2*400+4*600)	1(600)	3(400)	16(7*400+9*600)	
(Km,%) VAL Platform	134(65,36)	45(13,72%)	210(30,65%)	165(37,93%)	0,0	134(65,36)	286(29,33%)	

Table 3b							
	CALIFORNIA			NEVADA			HSL TAHOE Line
	Section XI Sacramento-SB CA/NE	Section XII Riverside-SBCA/NE	Section XI y XII Connection with Nevada	Section NE I SB CA/NE-Reno-Carson	Section NE II SB CA/NE- Las Vegas	Section NE I y NE II Connection with California	
(Mi/Km) Total Length	81/130	168/270	249/400	46,5/75	36/58	82,5/133	127,5/205
(Km)Tunnels total length	28,5	129,5	158	31,5	6,5	38,0	60,0
Number TSAP/PAETs	3	5	8	1	0	1	4
Number Tunnels	3	8	11	2	1	3	5
Number Long tunnels	2	7	9	2	1	3	4
(Km)Length Long tunnels	12,5-12,5	16-11,5-16-30-21,5-23-10,5	12,5-12,5-16-11,5-16-30-21,5-23-10,5	16-15,5	6,5	16-15,5-6,5	16-15,5-12,5-12,5
Construction works	27	43	70	6	6	12	33
Hwy cross	3	7	10	1	2	3	4
Multilane cross	2	7	9	2		2	4
Other roads cross	7	17	24		2	2	7
Railway cross	9	3	12		1	1	9
River bridges	6	9	15	3	1	4	9
(\$/km) Unit cost	18,80	13,67	15,73	37,50	14,80	27,60	25,64
(M\$) Line cost	2444	3846	6290	2812	859	3671	5256
(M\$) Station cost			0	218	109	327	218
(M\$) Total cost	2444	3846	6290	3030	968	3998	5474
(Km/h) Commercial speed	278	306	297	276	306	289	277
Travel time	0h28m	0h53m	1h21m	0h16m	0h12m	0h28m	0h44m
(Millions/year) Travellers	4,12	4,36	8,26	4,12	4,36	8,48	4,12
(Nb,p) TAV Trains	3(400)	3(400)	6(400)	3(400)	3(400)	6(400)	3(400)
(nb,p) VAL trains	3(400)	3(400)	6(400)	3(400)	3(400)	6(400)	3(400)
(Km,%) VAL Platform	68Km(52,30%)	45Km(16,66%)	113Km(28,25%)	56Km(74,66%)		56Km(42,11%)	134(65,36)

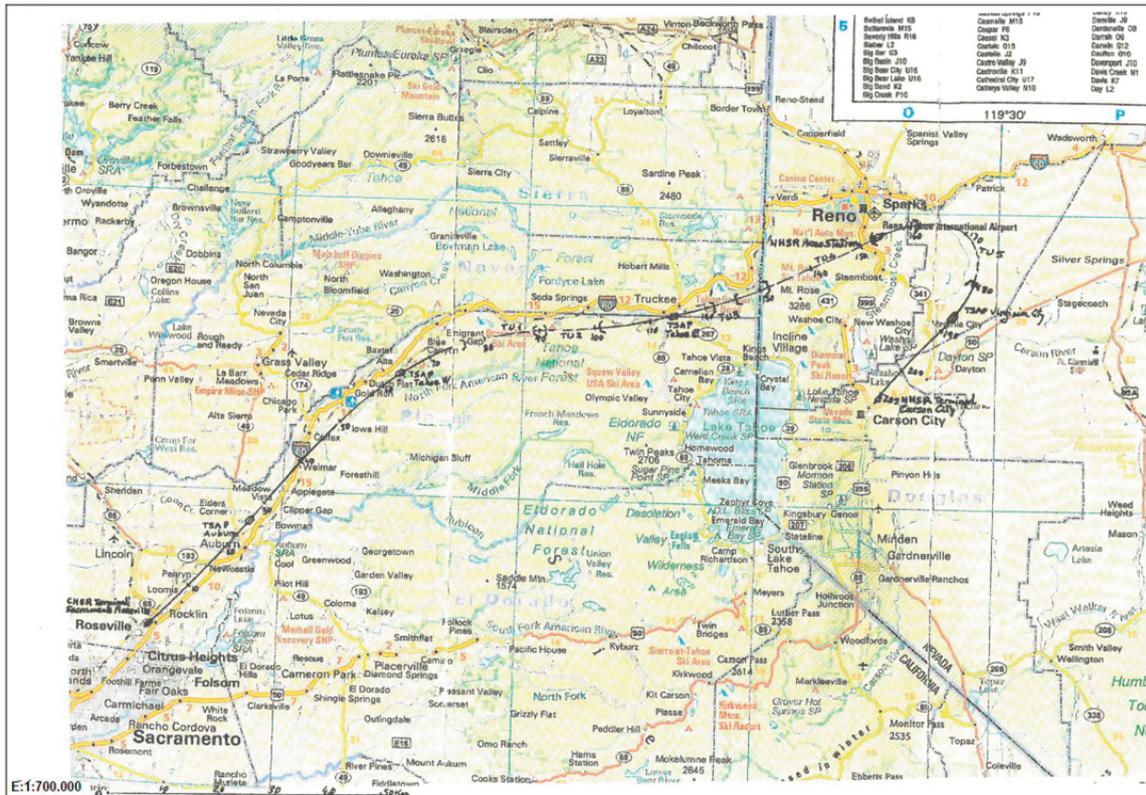


Figura 13a. HSL SACRAMENTO-RENO-CARSON CITY (USHSRs NORTH CONNECTION CALIFORNIA-NEVADA)

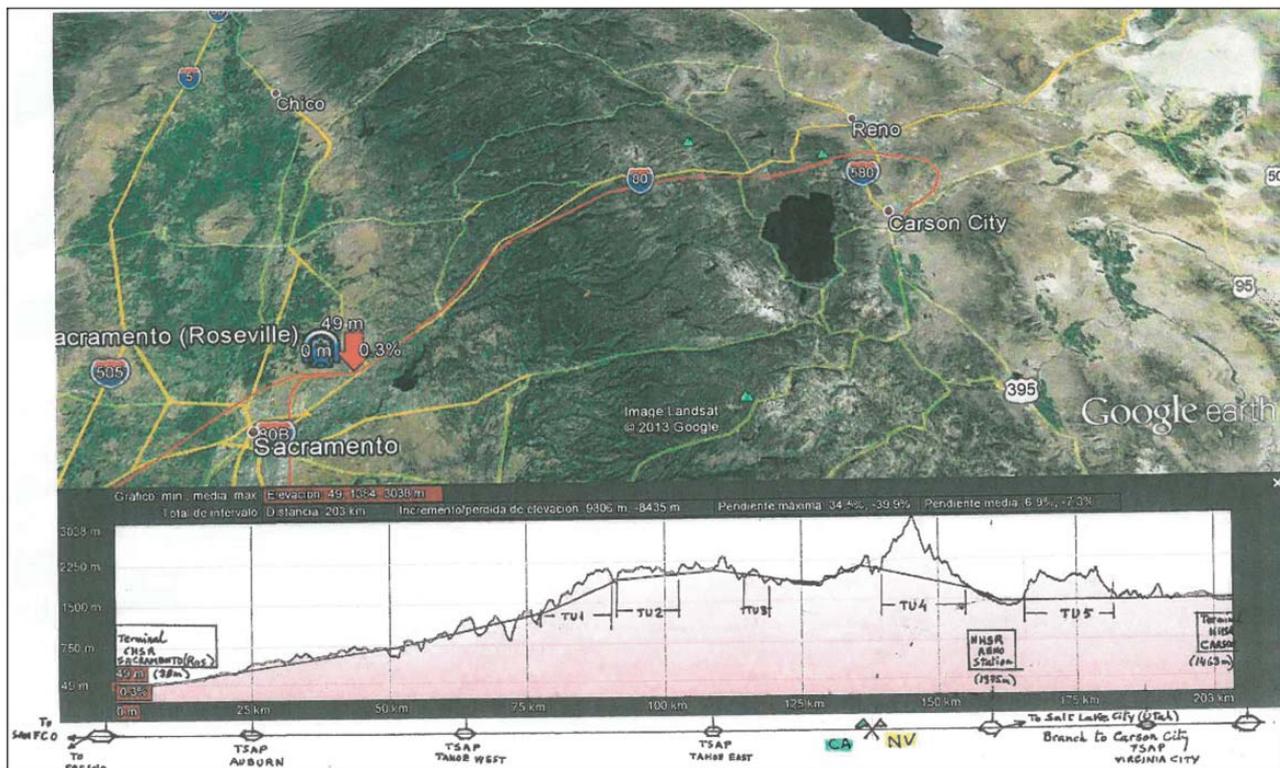


Figura 13b. HSL SACRAMENTO-RENO-CARSON CITY (USHSRs NORTH CONNECTION CALIFORNIA-NEVADA)

3.3 Línea U.S.H.S.R. Reno-Salt Lake City

(Descripción tomada del Proyecto Nevut)

Conexión redes HSR de los estados de Nevada y Utah

Solución propuesta: “GREAT BASIN LINE”

La conexión de las redes de alta velocidad ferroviaria de los Estados de Nevada y Utah se realiza con la “Great Basin Line”, cuyo proyecto parte de la Estación HSR de la ciudad de Reno en Nevada, comunicando esta ciudad (y la capital del Estado de Nevada, Carson City, a través del Ramal Reno-Carson de 45 Km, ya descrito en la “Tahoe Line”) con la capital del Estado de Utah, Salt Lake City. A la estación de Salt Lake City llegará en su día la línea que partiendo de Boise, comunicará los estados de Idaho y Utah.

La Great Basin Line, con una longitud de 680 Km (423 mile), se desarrolla a través del Great Basin, con 500 Km en Nevada y 180 Km en Utah (Figuras 14 y 15).

Se proyectan siete PAETs/TSAPs, seis en Nevada, situados aproximadamente en pk 90 (**Fallon**), pk 165 (**Dixie Valley**), pk 240 (**Antelope Valley**), pk 340 (**Eureka**), pk 440 (**Currie**) y pk 500 (**Bonneville, Station/TSAP**), y uno en Utah, pk 620 (**Timpie**), además de los situados en la HSR Station de **Reno** y en la Terminal HSR de **Salt Lake City**.

El anteproyecto de esta línea se diseña con cinco túneles, tres de ellos “*short tunnels*” en Utah y dos “*long tunnels*” de 35Km cada uno, en Nevada, y doce grandes viaductos, cinco múltiples de tramo recto de 100m de luz sobre lagos y amplios cursos de agua a lo largo de la línea en el Estado de Nevada y siete puentes colgantes de tres vanos (400-800-400) alineados con anclaje común entre cada dos en el Puente Colgante múltiple “*HSR Great Salt Lake Suspension Bridge*” de 11.200m de longitud, en el Estado de Utah, a la entrada de la ciudad de **Salt Lake City**, así diseñado para atravesar la parte Sur del Great Salt Lake ante la posibilidad de licuefacción de los sedimentos modernos de este lago por sismos relacionados con las principales fallas de la Wasatch Range.

Este puente, similar a los del cruce de la Bahía de San Francisco, constituiría junto con ellos una especie de **pórticos** del primer tramo “*Pacific Side*” **San Francisco-Salt Lake City** del *Trayecto Intercostas San Francisco-Washington*.

A continuación (Tabla 4) se presenta desglosada por Estados y por Capítulos, la valoración estimada de esta línea, incluida anteriormente de forma global en la parte descriptiva y de planteamiento del Proyecto Intercostas Way I (Tabla 1).



Figura 14. USHSR "GREAT BASIN LINE" "RENO-SALT LAKE CITY" (GBL) Planta

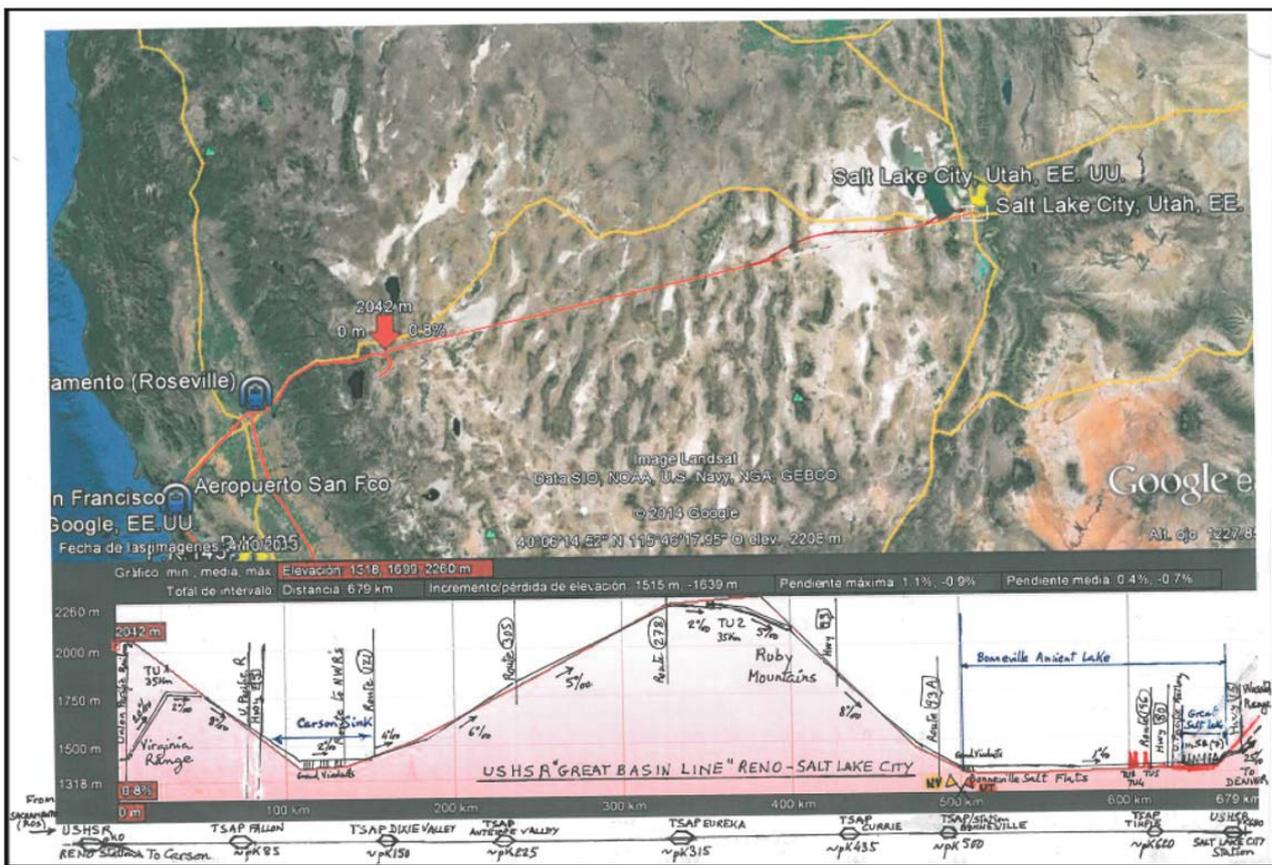


Figura 15. USHSR "GREAT BASIN LINE" "RENO-SALT LAKE CITY" (GBL) Perfil

Línea Reno-Salt Lake City

Tabla 4 - Valoración para conocimiento de la Administración (PEM en M\$)

Capítulos\Estados	NEVADA	UTAH	Línea "GBL"
A-Infraestructura	6.280	3.125	9.405
M de Tierras	3.765	1.307	5.078
Túneles	2.422	127	2.549
Estructuras	93	1.691	1.784
B-Superestructura	1.105	380	1.485
C-Instalaciones	1.449	522	1.971
D-Prot.Medioamb.	241	86	227
E-Design/Q.C./Manag.	167	60	327
F-Estaciones	117	154	271
TOTAL	9.359	4.327	13.686
	68,38%	31,62%	100%

Referencias

- 1- Fort, L (2004) "Safety in High Speed Railway Tunnels" ISBN 84-89456-23-2, 2 nd Edition (Presented in Praga) Cersa. Madrid. Spain
- 2- Laorden, L (2009) "Caminantes y Caminos en la frontera del Oeste norteamericano español, 1529-1821" Conferencia en el Colegio de ICCP. Valladolid, Spain
- 3- Fort, L & Fort, C (2011) "Earth Moving Geoenvironmental workability in California" Geocongress 2012 Oakland, California, USA
- 4- Fort, L & Fort, C (2011) "Soil reinforcement vegetation effect. Analysis applied to the earth moving volume of the California High Speed Railway System" International Symposium on Ground Improvement IS-GI 2012 Brussels, Belgium
- 5- Tadaki, Kawada (2011) "History of the modern Suspension Bridges" ASCE press Ed. By Richard Scott, Reston, Virginia USA
- 6- Diaz del Rio, M; Fort, L & Fort, C (2012-2014) "High Speed Railway in California (USA)" Revista Ingeniería Civil 167/2012-169/2013-170/2013-172/2013-173/2014 CEDEX Ministerio de Fomento Madrid, Spain
- 7- Fort, C (2014) "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 ETSICCP (UPM) Madrid, Spain
- 8- Fort, L & Fort, C (2014) "Proyecto CANEVAR" (Conexión de las Redes HSR de los Estados de California, Nevada y Arizona. (Ref. 149458 Colegio I.C.C.P) Madrid, Spain
- 9- Fort, L & Fort, C (2015) "Proyecto NEVUT" (Conexión de las Redes HSR de los Estados de Nevada y Utah. (Colegio I.C.C.P) Madrid, Spain.

Silla plegable para retroceso de trenes

Folding seat for trains going back

Víctor Sánchez Jaén

Resumen

Dispositivo en forma de silla plegable para colocar en el gancho de tracción de cualquier vagón. De reducidas dimensiones, poco peso y de fácil y rápida instalación. Dotada de cinturón de seguridad, foco y silbato (alimentado por el propio aire comprimido del tren)

Desde la misma, un operario controla el freno automático del tren en movimientos de retroceso. En caso de desvanecimiento o accidente del operario, se produce el frenado automático e inmediato del mismo.

Palabras clave: Silla plegable, retroceso, trenes.

Abstract

This original device lets trains go back without the necessity to change the engine from the top to the bottom of the train. It is a folding chair which is placed in the last hook, in the bottom of the train. The worker sitting in the seat handles the train brakes. Unless the rail worker does not push the pedal, the train does not go on. So this action is important when there is any problem with the worker. If he falls to the railroad track, the train stops immediately.

The small and light chair has a seat belt, a light and a whistle that both run on train compressed air. You can setup the device very fast, in about one minute.

Keywords: Folding seat, Trains going back, Automatic brakes.

1. Introducción

Según la normativa ferroviaria en vigor, los trenes no pueden retroceder (o las maniobras empujar) sin antes adoptar una serie de medidas de seguridad, tendentes a suplir la falta de visibilidad del maquinista, el cual se ubicará en cola respecto del sentido del movimiento; algunos trenes pueden alcanzar los 700 metros de longitud.

Para ello, un agente debe situarse en el primer vagón en sentido del movimiento de retroceso (vagón de cola del tren), en el caso poco probable de que dicho vagón disponga de un lugar apropiado y con las garantías de seguridad personal suficientes; la otra opción es que el operario lo acompañe a pie, examinando la parte de vía que precede al movimiento. En ambos casos, deberá transmitir al maquinista, mediante señales a mano o emisora, las órdenes de avance y parada que fueren necesarias.

Para casos de retroceso de trenes a una estación anterior por no poder continuar la marcha (impotencia de la locomotora ante alguna rampa, avería de un tren precedente, interceptación de la vía, rotura de carril, etc.), este procedimiento se hace prácticamente inviable, por la gran cantidad de tiempo que se necesita para recorrer esas distancias y por la falta de seguridad a la hora de detener el convoy en caso de emergencia. En esos casos, se hace necesario el envío de otra locomotora hacia la cola del tren detenido, para socorrerlo, locomotora que no siempre está disponible cercana al lugar de la incidencia, dilatando así los tiempos para liberar la vía, con el consiguiente coste económico y de tiempo (retrasos al mismo tren y a otros, además del ocasionado por el uso de dicha locomotora auxiliar y personal pertinente).

En caso de maniobras hacia apartaderos situados a varios kilómetros, la circulación se viene haciendo en la mayoría de los casos colocando la locomotora en primer lugar en el sentido del movimiento, debiendo ser cambiada de posición cada vez que sea necesario invertir el sentido para situar vagones en las distintas dependencias del apartadero, con la pérdida de tiempo que conllevan dichas operaciones. Se dan casos particulares en los que se utilizan dos locomotoras, una en cabeza y otra en cola, para efectuar movimientos de avance y retroceso indistintamente, extremo que resulta costoso en medios materiales y humanos.

Asimismo, en caso de trenes de trabajo que operan en plena vía, si conviene que la composición sea empujada, se recorren grandes distancias a muy poca velocidad, con la consiguiente pérdida de tiempo. En caso de que saliera con la locomotora en cabeza, una vez descargado debería avanzar hasta la estación siguiente para invertir la locomotora o retroceder a muy baja velocidad a la estación de procedencia.

La silla de retroceso aquí reseñada resuelve todos los inconvenientes descritos, pues permite el retroceso de trenes y maniobras con total seguridad y a mayor velocidad, ya que el agente que va situado en ella tiene el mando del freno automático del tren así como una bocina y foco para advertir a los posibles invasores de la vía. En caso de accidente o desvanecimiento del agente, se producirá el frenado automático e instantáneo del tren.

2. Descripción

El dispositivo consiste en una silla plegable (se reduce al tamaño de un pequeño maletín, de fácil transporte manual). Va provista de una conexión para tubería de aire comprimido de 5kg/cm², una bocina, foco y cinturón de seguridad para el operario.



Fig. 1. Posición plegada

Una vez desplegada, se coloca directamente sobre el gancho de tracción de cualquier vagón, quedando anclada de una forma fácil, segura y rápida.



Fig. 2. Anclaje en el gancho de tracción

A continuación se conecta a la tubería del freno automático del tren mediante el acoplamiento estándar con el que va dotada.



Fig. 3. Acoplamiento de manga de freno



Fig. 4. Posición de trabajo

3. Funcionamiento

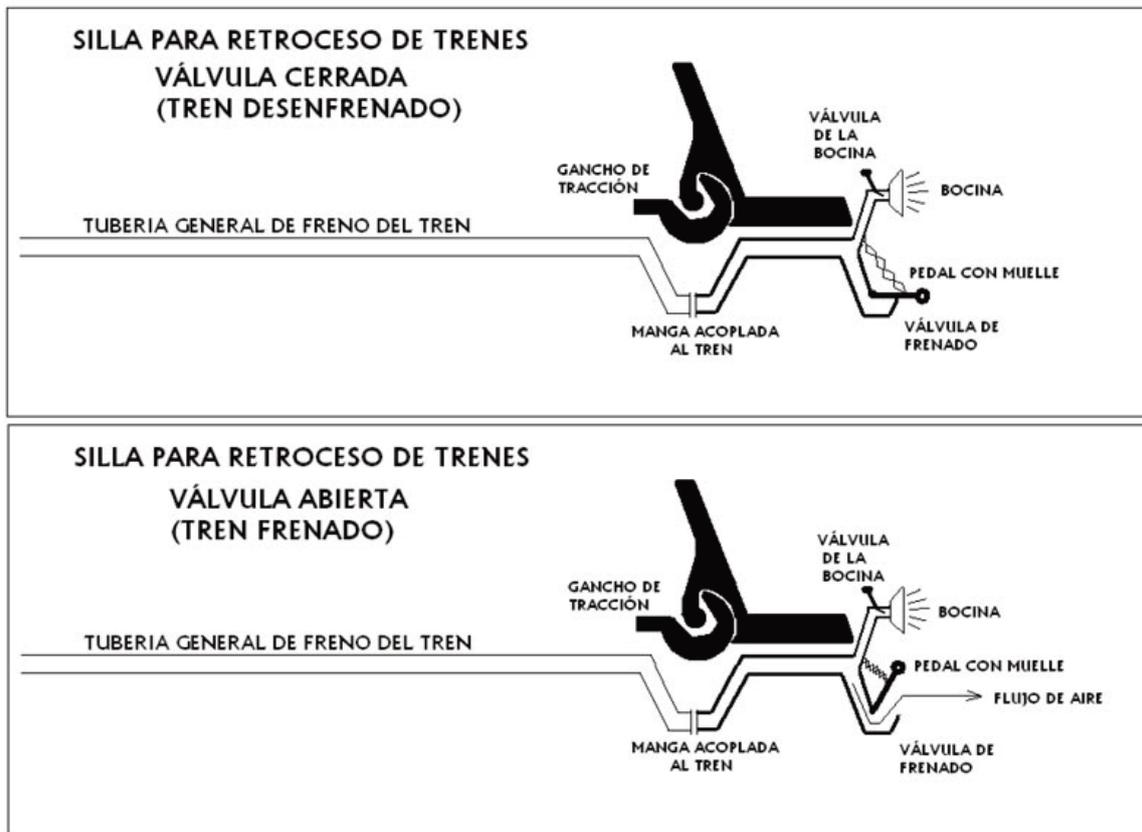


Fig. 5. Esquemas

Una vez instalada la silla en el gancho de tracción, conectada su manga a la tubería general de freno del tren y el operario sentado en la misma con el cinturón de seguridad abrochado, éste debe cerrar con el pie la válvula de frenado, venciendo la resistencia del muelle recuperador que la mantiene abierta. De esta forma, dicha tubería recupera la presión necesaria para producir el afloje del tren y poder iniciar la marcha.

Para regular la marcha o frenar, no tiene más que levantar el pie con el ángulo necesario para que se produzca la salida de aire.

Asimismo puede hacer uso de la bocina accionando con la mano la válvula que tiene a su alcance.

En caso de desvanecimiento o accidente del operario, el pedal recupera su posición inicial por acción del muelle, por lo que se produce el frenado automático e inmediato del tren.

4. Conclusión

Este dispositivo permite retroceder cualquier tren, independientemente de su longitud y trayecto a recorrer, con las garantías suficientes de seguridad, según lo que exige la normativa actual sobre circulación de trenes, y con una velocidad aceptable para casos de maniobras o retrocesos por incidencia.

La misma brindaría un alto ahorro económico al suprimir muchas horas de maniobras tendientes a cambiar la locomotora de cabeza a cola para situar vagones en las distintas dependencias que configuran los apartaderos particulares y puertos. Asimismo supondría gran ahorro de tiempo por retrasos producidos a otros trenes en casos de incidencias en la marcha, pues permite retirar el tren de forma rápida y segura de la vía que ocupa, sin esperar el envío de locomotoras de socorro.

Se puede instalar de forma rápida, fácil y segura en el gancho de tracción de cualquier tipo de vagón, siendo muy manejable y de poco peso.

Plegada es de reducidas dimensiones, por lo que permitiría que todas las locomotoras llevaran una en su dotación.

El modelo aquí reflejado es un prototipo, y por lo tanto, mejorable en aspectos de diseño, peso y dimensiones.

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

Julio 2015
número 10

Materiales modificados con el fin de aminorar la génesis y/o propagación de vibraciones y/o ruido en una explotación ferroviaria

Repaso general y perspectiva tecnológica futura de la infraestructura de tracción ferroviaria (I)

Aplicación de la metodología RCM al mantenimiento de los motores de agujas en Metro Ligero Oeste

Propuesta para el desarrollo de la red de alta velocidad en EE.UU. (USHRS)

Red de alta velocidad de EE.UU. (USHRS). Trayecto intercostas San Francisco - Washington D.C. (Lado Pacífico)

Silla plegable para retroceso de trenes



FUNDACIÓN DE LOS
FERROCARRILES
ESPAÑOLES