



- **Estudio de eficiencia energética, sobre la reducción de temperatura, en instalaciones, tratadas con pintura de recubrimiento reflectantes**
Francisco Martín Navarro
- **Políticas Públicas en los Ferrocarriles: La Red Ferroviaria de la Región del Duero**
Pedro Pinto, André Pires
- **Análisis de las oportunidades medioambientales y económicas de la electrificación de una línea ferroviaria**
Javier Santander Gimeno
- **El GNL, un combustible alternativo para un ferrocarril aún más sostenible**
Claudio Rodríguez
- **Modelado de sistemas de almacenamiento de energía en ferrocarriles**
Pablo Minayo Ferreruela



vía libre técnica e investigación ferroviaria

CONSEJO EDITORIAL

Rosa Isabel Aza Conejo

Catedrática Escuela de Ciencias Empresariales,
Univ. de Oviedo

Ignacio Barrón de Angoit

Director de Proyectos Internacionales (Renfe
Operadora)

Pedro Casares Hontañón

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

José Vicente Colomer Ferrándiz

Catedrático de Transportes, UPV (Valencia)

Vicente Díaz López

Catedrático Ingeniería Mecánica, Universidad
Carlos III (Madrid)

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

Catedrático de Urbanística y Ordenación del
Territorio UPV (Valencia)

Juan Miguel Sánchez García

Asesor de Logística M. Fomento

Jordi Viñolas Prat

Director Escuelas Ingeniería y Arquitectura
Universidad Nebrija

EDITOR

Antonio Berrios Villalba

EDITOR ADJUNTO

Ignacio González Franco

Maquetación: Belén Romeo Garre

Coordinación editorial: J. Mariano Rodríguez

SOBRE LA REVISTA

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

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

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

La evaluación de los artículos de los números ordinarios corresponde al Consejo Asesor de la revista, que cuentan con el proceso de revisión técnica por pares (review peer) que consolidan la calidad del contenido, de manera justa e imparcial, mientras que las de los números extraordinarios se entiende asumida por el jurado en el caso de los premios, por el comité científico del congreso o por el grupo de investigadores en el caso de proyectos. En cualquier caso en el número correspondiente se publican los nombres de los responsables.

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

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

www.tecnica-vialibre.es/

La revista en formato digital puede ser descargada gratuitamente en:

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

Edita:

Fundación de los Ferrocarriles
Españoles

ISSN: 2174-0194

Depósito Legal: M-43355-2016



FUNDACIÓN DE LOS
FERROCARRILES
ESPAÑOLES

www.tecnica-vialibre.es/vltecnica

ÍNDICE / INDEX

- Estudio de eficiencia energética, sobre la reducción de temperatura, en instalaciones, tratadas con pintura de recubrimiento reflectante 3
Energy efficiency study of temperature reduction on the assets with reflective coatings
Francisco Martín Navarro

- Políticas Públicas en los Ferrocarriles: La Red Ferroviaria de la Región del Duero 33
Public Policies in Railways: The Railway Network in Douro Region
Pedro Pinto, André Pires

- Análisis de las oportunidades medioambientales y económicas de la electrificación de una línea ferroviaria 59
Analysis of the environmental and economical opportunities in railway electrification
Javier Santander Gimeno

- El GNL, un combustible alternativo para un ferrocarril aún más sostenible 71
LNG, an alternative fuel for an even more sustainable railway
Claudio Rodríguez

- Modelado de sistemas de almacenamiento de energía en ferrocarriles 97
Modeling of energy storage systems in railways
Pablo Minayo Ferreruela

Estudio de eficiencia energética, sobre la reducción de temperatura, en instalaciones, tratadas con pintura de recubrimiento reflectante

Energy efficiency study of temperature reduction on the assets with reflective coatings

Francisco Martín Navarro

Eficiencia energética

Resumen

Cualquiera de los sistemas utilizados para aislar térmicamente un edificio, debe conseguir crear una barrera térmica, entre el exterior y el interior, que reduzca el flujo de energía, garantizando a su vez una serie de propiedades como son el buen comportamiento higrotérmico¹ de los materiales utilizados (evitando humedades interiores), asegurando la renovación del aire interior, la obtención de una mejora significativa en la eficiencia energética y el respeto al medio ambiente.

Una de las mayores ventajas en el uso de pinturas reflectantes en la edificación, es que tiene un alto índice de albedo, es decir, la proporción existente entre la energía luminosa que incide en una superficie y la que ésta refleja. Gracias a ello, el calor en el interior de las edificaciones (casas / almacenes/naves / armarios a la intemperie, etc.), disminuye, mejorando el ahorro energético. La tecnología “Cool Roof” (techo frío), investiga y aplica

materiales de alto Índice de Reflectancia Solar (SRI). El cálculo del índice SRI se efectúa combinando los valores de Reflectancia Solar (ratio de radiación solar reflejada por superficie de cubierta) y de Emitancia² Térmica (capacidad de devolver a la atmósfera el calor absorbido).

Los valores del índice SRI suelen oscilar entre 0 y 100, aunque técnicamente pueden darse valores inferiores a 0 o mayores de 100. A mayor valor de índice SRI, mejor capacidad de refrigeración de una superficie.

La utilización de materiales “Cool Roof” forma parte de programas de certificación de edificios sostenibles, por ejemplo el programa LEED. LEED (Leadership in Energy & Environmental Design), que ha sido desarrollado por el US Green Building Council, y se compone de un conjunto de normas sobre la utilización de estrategias encaminadas a la sostenibilidad en edificios de todo tipo (prolongación de la vida útil de los materiales).

Para aprobar los requisitos LEED, el índice de reflectancia solar de los materiales (SRI) en cubiertas planas debe ser igual o superior a 78.

La industria de tecnologías de la construcción en EEUU está integrando nuevas soluciones “Cool Roof” para edificios de obra nueva o para rehabilitación de cubiertas (paredes y techos) existentes. Esta misma tecnología puede aplicarse en países con altos niveles de insolación (España), las soluciones “Cool Roof” son adecuadas para prácticamente cualquier edificación; y son especialmente idóneas para edificios de uso público, y áreas industriales, donde se busca reducir el impacto del calor externo al interior de las naves o inmuebles de todo tipo con un alto impacto de energía solar en su cubierta o paredes.

Todas las pruebas realizadas en este trabajo, ha obtenido un SRI muy alto y se pueden aplicar en todo tipo de materiales como, arcilla, cemento, yeso, chapa, madera, etc.

Ventajas de las cubiertas reflectantes:

Las ventajas de los revestimientos de “techo frío - COOL ROOF” incluyen ahorro energético, aumento del valor de los inmuebles, mayor duración de las cubiertas y mejora general del entorno urbano.

La utilización de materiales “Cool Roof” es parte de programas de certificación de edificios sostenibles.

España, por su alto nivel de insolación media, es uno de los países que mayor partido puede sacar de la tecnología de “techo frío”.

1. Reducción del consumo de energía en los edificios que usan equipos de aire acondicionado: el uso de cubiertas reflectantes de “techo frío” puede suponer un ahorro de entre el 10 y el 30 % en consumo de energía para climatización y aire acondicionado⁽¹⁾;
2. Aumento de la vida útil de la impermeabilización de las cubiertas, ya que la superficie pintada protege los materiales del calor y los rayos solares;

con el consiguiente ahorro de coste de mantenimiento.

3. Uso de programas de certificación de edificios sostenibles, como LEED.
4. Reducción del efecto “isla de calor” de las ciudades, posibilitando que sus “células” -los edificios- tengan menor temperatura individual y por ende reducir el consumo de energía.

El uso de cubiertas de “techo frío” tiene una amplia implementación en Estados Unidos. El Cool Roof Rating Council, (CRRC) se ocupa en Estados Unidos de la validación y medición de cubiertas Cool Roof. En Europa opera desde 2011 el European Cool Roofs Council, (ECRC).

(1) Según la documentación disponible en CRRC.

1 La palabra *transpirabilidad* no está en el Diccionario “comportamiento higrotermico” = Definición de Condiciones higrotérmicas. CTE HE - Son las condiciones de temperatura seca y humedad relativa que prevalecen en los ambientes exterior e interior para el cálculo de las condensaciones intersticiales.

Albedo, es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.

2 La palabra *Emitancia* no está en el Diccionario. *emitanza térmica* es la cantidad de flujo de calor que emite una superficie por unidad de área.

Palabras clave: Eficiencia energética, Pintura de recubrimiento reflectante que permiten ahorrar energía.

Summary

Thermal treatment systems used on buildings must grant a thermal barrier between the inner and outer climate conditions that reduce energy flow providing several physical properties like permeability of materials (preventing humidity) and ensuring air circulation through the building.

One of the greatest advantages of reflective coatings in construction is their high albedo index, in other words, their high power to return to the atmosphere part of the radiation received.

Cool Roof technology uses materials that have a high level of SRI (Solar Reflectance Index).

SRI combines solar reflectance (the ability of a material to reflect solar energy) and thermal emittance (the ability of a material to radiate absorbed heat) in an equation.

SRI values range from 0 to 100, with the higher value the better, although in practice values below 0 and about 100 are also possible.

The use of cool roof materials is included in sustainable buildings certification programs such as LEED. LEED (Leadership in Energy & Environmental Design) has been developed by the US Green Building Council and consists of several standards about strategies focused on increasing sustainability in all sorts of buildings.

In order to validate the requirements of LEED, SRI must be greater or equal than 78.

The American construction industry is incorporating new cool roof solutions in newly constructed buildings and for the renovation of old roofs. This technology can be applied in countries with high amounts of sunshine (like Spain). Cool roof solutions are suitable on all building types and they are especially appropriate for public buildings and industrial zones where the aim is to reduce thermal stresses in areas with lots of sunshine.

High levels of SRI have been attained in all tests. The results can be applied to several materials like clay, cement, plaster, sheet, wood, etc.

The advantages of cool roof coatings are the reduction in the energy consumptions, the increase in the value of the assets and the overall improvement of the urban environment.

The use of cool roof materials is included in sustainable buildings certification programs.

Spain, for its high level of average sunlight exposure, could be one of the most benefited countries by the cool roof technology.

1. Reduction in the energy consumption in air-conditioned buildings: the use of cool roof covers may mean between 10 and 30 percent reduction in cooling-energy.
2. Lifetime extension of the waterproofing roofs, due to the painted surface protects the materials from heat and UV radiation with the consequent saving in running and maintenance costs.
3. Use of Green Buildings Certification Programs, like LEED.
4. Reduction of heat island effect due to their "cells" (buildings) have lower temperature. This makes it possible to reduce the energy consumption.

The use of cool roof covers is very widespread in the United States. The Cool Roof Rating Council (CRRCC) created in 1998 in the USA is responsible for developing methods for evaluating the radiative properties of roofing products. European Cool Roofs Council (ECRC) was created in 2011.

(1) According to the documentation available in CRRCC.

Keywords: energy efficiency, reflective coatings that allow saving energy.

1. INTRODUCCION

Pruebas funcionales del comportamiento de la pintura de recubrimiento reflectante.

La eficiencia energética tiene como objeto reducir el consumo de energía y mejorar el uso de la misma¹, optimizando los procesos productivos, obteniendo con ello, ventajas medio-ambientales objetivas, al disminuir, tanto, el consumo de la energía utilizada, como los costes económicos asociados.

Las pinturas reflectantes, reflejan o reflejan la luz, ya sea natural (luz solar) o artificial y además tienen la propiedad de disipar el calor producido por esa radiación, evitando el estrés térmico de las superficies donde se aplica.

Desde hace tiempo, las pinturas que reflejan la radiación solar y disipan el calor, vienen utilizándose en edificios y viviendas con el fin de mantener a temperatura estable y relativamente baja en las mismas, de manera que descienda el consumo de energía, limitando la utilización de equipos de refrigeración.

Dentro de sus propiedades, existen otra serie de características, como son las de aumentar la durabilidad de los materiales de construcción (reduce la oscilación térmica), evitando su envejecimiento prematuro o degradación, provocada por la radiación solar, así como, impide los daños causados por las contracciones y expansiones térmicas de los materiales, que son consecuencia, principalmente de la radiación infrarroja, que es la encargada de producir energía calorífica en un 50 %.

El presente estudio de eficiencia energética, se basa en comprobar el comportamiento en los materiales, y la reducción en el consumo de energía, con la aplicación de pintura de recubrimiento reflectante. Comprobando, las ventajas que aporta como aislante térmico.

Las diversas pruebas, se han realizado en el entorno ferroviario, como son: casetas de obra equipadas con material electrónico de alta sensibilidad, armarios de señalización de vía equipados expuestos a altas temperaturas exteriores, armarios metálicos con equipos electrónicos y cofres de aire acondicionado situados en el techo de los tranvías Siemens de la serie 3800 en Valencia.

Las pruebas, se han desarrollado principalmente durante los meses de junio/julio/agosto/septiembre de 2016, al ser estos meses donde la radiación solar tiene una mayor incidencia, lo que ha permitido comprobar su mayor grado de efectividad.

Los datos de la muestra proceden de la verificación de temperaturas interiores/exteriores, en intervalos de 15 minutos (*en la caseta de obra*) y así obtener una mejor representación de la muestra. La toma de datos está comprendida entre los días 21 y el 29 de junio (casetas sin pintar) y entre el 1 y el 11 de julio (casetas pintadas), y cada 30 minutos, en el caso de los armarios metálicos, al tener la muestra un mayor recorrido, desde el 12 al 22 de julio en el caso de los armarios de Pinar de Antequera (Valladolid) y desde 19 de julio al 12 de septiembre, en los armarios de Santa Catalina (Madrid).

Este proyecto puede servir para comprobar la efectividad que este tipo de pintura, y su uso en instalaciones fijas sometidas a altas temperaturas exteriores, puede contribuir con al ahorro económico, con reducción de equipos de refrigeración y la mejora medio ambiental, al utilizar un material aislante, de efecto barrera del impacto térmico.

Este proyecto servirá de base para utilizar este tipo de pintura en todas las instalaciones que precisen de una mejora en el control de la eficiencia energética, que permita prolongar la vida útil de los equipos electrónicos, y suponga una reducción del consumo energético de instalaciones fijas, como naves industriales, almacenes, depósitos de combustibles o GLP's, instalaciones agrícolas y ganaderas y en especial en obra civil.

El funcionamiento de las pinturas reflectantes se basa principalmente en el uso de colores claros, ya que estos son los que tienen mayor capacidad de reflejar, y cuyo índice SRI es superior a 75. En el presente estudio se ha utilizado, una solución para la reflectancia en pinturas de color blanco no brillante, a base de micro esferas de vidrio u otros productos cerámicos dispersos en pinturas de base acrílica, que serán las encargadas de reflejar y dispersar la luz así como la energía térmica.

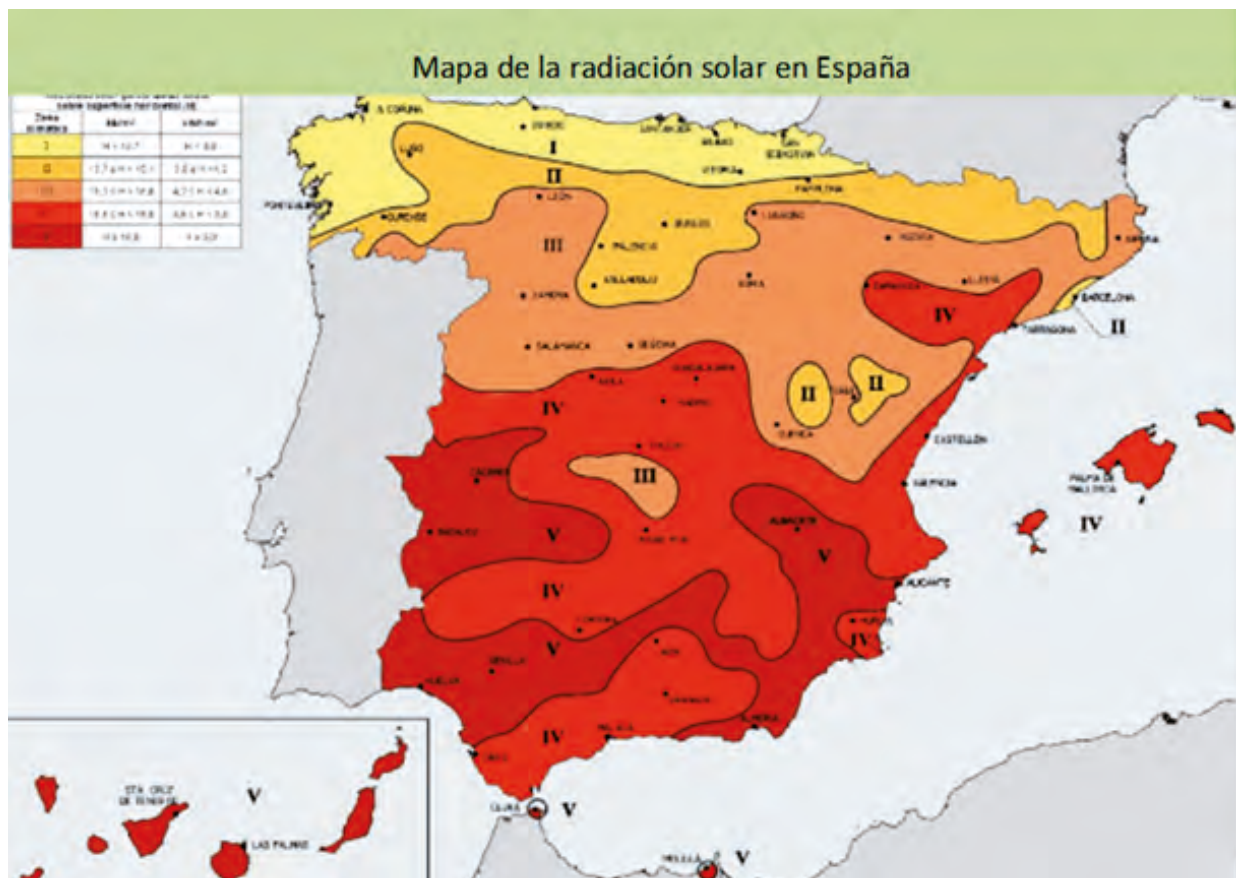
Los recubrimientos blancos comunes, exhiben una reflectancia del 75 por ciento o superior, es decir, absorbe el 25 por ciento de la energía incidente y reflejará el 75 restante. En cambio, un recubrimiento a base de negro de carbono tiene un índice de reflectancia del 4 por ciento en promedio.

Este fundamento de las pinturas reflectantes puede llegar a ser insuficiente, con la preponderancia de colores medios y oscuros en edificaciones.

La eficiencia de los pigmentos en cuanto a la dispersión de la energía, está en función de la relación entre el diámetro de las partículas o micro esferas y la longitud de onda de la radiación incidente.

En todas las pruebas se han utilizado sondas térmicas de registro continuado de temperatura y humedad Tinytag Ultra 2 Temperature/ Relative Humidity Logger (Mod. TGU - 4500).

2. CONSIDERACIONES GENERALES. ¿QUÉ SIGNIFICA AISLAR TÉRMICAMENTE UNA INSTALACIÓN?



Todas las instalaciones fijas están sometidas al influjo del sol y de las temperaturas exteriores, por tanto, vienen sufriendo las inclemencias climatológicas externas, lo que supone estar sometido a los diferentes cambios climáticos y las condiciones atmosféricas a las que nos supedita el entorno natural, precisando la adaptación al medio para controlar las condiciones internas en las instalaciones.

Todas las instalaciones que están a la intemperie, tienden a acercarse a las condiciones de confort, en los que la variable térmica es la clave, éste es un objetivo, dentro de las limitaciones impuestas por cada lugar o época, precisando para ello, de elementos aislantes que reduzcan la oscilación térmica de temperaturas extremas a las que la climatología produce, intentando adecuarlas a rangos estables y controlados, permitiendo conseguir unos valores, que no condicionen o perjudiquen, las condiciones de vida de las personas y de los materiales.

Pero sobre todo, son los criterios medioambientales y de sostenibilidad los que comportan el uso adecuado de los recursos, procurando que la mejora que supone el uso de barreras térmicas aislantes, permitan una mayor eficiencia energética y un mejor aprovechamiento de los recursos, de una manera eficaz y duradera.

Pero la eficacia térmica depende de varios factores:

- **La configuración de las condiciones propias del lugar**, topografía, vegetación, orientación, soleamiento, vientos y lluvias dominante, etc., este factor, forma parte del proyecto inicial.
- **La inercia térmica de la instalación**, bien industrial o urbana, que precisará unas condiciones locales, pudiendo precisar una mayor o menor capacidad calórica. Cuanto mayor inercia térmica tenga el edificio, es decir, cuanta mayor capacidad calórica, más estable será la construcción ante los cambios de temperaturas exteriores. Esto es aplicable a climas extremos y con intensa radiación solar.
- **Ventilación de la superficie envolvente**. En climas de intensa radiación solar, o con problemas de elevada humedad, la ventilación de la superficie envolvente equivale a poner una mayor protección. Beneficiándose, a efectos de disipar el calor, en climas con gran radiación solar y de secar cualquier humedad retenida en la envolvente, en climas con muchas precipitaciones y fuentes de humedad en general.
- **El color de las superficies exteriores de la envolvente**. Muy importante de cara a controlar el efecto de la radiación solar, -con colores oscuros- <mayor absorción de radiación>, menor con colores claros.
- **Aislamiento térmico de la envolvente**. Los diferentes tipos de productos utilizados en la construcción y la industria, se basan principalmente de planchas o elementos aislantes que en definitiva tiene un efecto condicional de la construcción, (cámaras huecas, espumas o productos químicos, etc.), que en definitiva tienen un alto coste de conservación y mantenimiento.

Los criterios de sostenibilidad, eficiencia energética y reducción de costes, son los utilizados actualmente, para atender las necesidades de control de consumos, tanto en la instalación de equipos de aire acondicionado, en refrigeración como en calefacción, proporcionando un dimensionamiento, más acertado, en cuanto a la modelización de proyectos y su adecuada instalación en su desarrollo final.

Teniendo en cuenta:

- La vida útil del edificio o instalación, depende de su conservación, su mantenimiento, y el rendimiento solicitado. Todo ello, son costes adicionales diferidos, mientras que una envolvente bien construida, bien aislada, reduce considerablemente esta partida.
- La normalización y certificación de los productos aislantes, permitiría asegurar una calidad fiable, adecuada y exigible, en las instalaciones industriales y edificios de obra civil.

2.1 CÓMO FUNCIONA UN AISLAMIENTO TÉRMICO

- El aislamiento térmico genera una protección, que reduce la transmitancia³ térmica (valor U), antiguo, coeficiente K de transmisión térmica) a través de la superficie envolvente, proporcionando un consumo eficiente de energía.

$$R = \frac{1}{U} = \frac{\text{espesor}}{\text{conductividad}} \left[\frac{\text{m}}{\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})} \right] = \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$$

En todos los casos, las prestaciones térmicas en las instalaciones, vienen definidas, tanto por el aislamiento que se implementa en el envolvente, como por la que ofrece el material de construcción. El valor que define dichas prestaciones es la conductividad térmica λ (lambda), y en la formula anterior se puede obtener una R para cualquier material, puesto que no hay ningún superconductor del calor como para tener una conductividad infinita. Del mismo modo, no existe ningún super aislante que corte absolutamente el flujo de calor con una conductividad nula (=0).

En el sol se producen una serie de reacciones nucleares que mantienen como consecuencia la emisión de cantidades enormes de energía, prácticamente toda la energía que nos llega del Sol está constituida por:

- Calor y Luz.

Por un lado la radiación infrarroja, ultravioleta y por otra luz.

La atmósfera absorbe gran parte de la radiación infrarroja y ultravioleta, no obstante, el calor generado en el calentamiento de las superficies transfiere esa energía.

El uso racional de la energía, es una necesidad que implica a la disponibilidad limitada de los recursos naturales por un lado y de otro a la capacidad limitada de absorción de los gases de combustión del planeta.

Constituyendo una parte muy importante el consumo del sector industrial y de transporte como agente consumidor de grandes cantidades de energía, en Europa se cifra en el 55% del consumo total, por tanto el ahorro de energía es un objetivo claro y conciso de actuación para reducir el alto coste de dependencia que esto supone.

Concienciar del uso racional en el consumo industrial y de edificación, a sectores con graves dependencias energéticas, que hagan reducir los límites sostenibles con la aplicación de medidas pasivas, permitirá mantener estándares de crecimiento adecuados, sin incrementos exponenciales de consumos.

3. ENTORNO NORMATIVO

Bajo estas premisas y al amparo de lo dispuesto en la Directiva (Directiva 2012/27/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, fue publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea el 14 de noviembre de 2012).

“La nueva Directiva de Eficiencia Energética surge en un marco en el que se constata que la

³ La palabra transmitancia : transmitancia térmica (U) es la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferido a través de un sistema constructivo, formado por una o más capas de material, de caras plano paralelas, cuando hay un gradiente térmico de 1°C (1 K) de temperatura entre los dos ambientes que éste separa.

Unión Europea no va a alcanzar el objetivo de aumentar en un 20% la eficiencia energética en 2020. En este contexto ha sido necesario actualizar el marco legal de la Unión en materia de eficiencia energética, creando un marco común, mediante una Directiva que no sólo refuerce dicho objetivo, sino que también favorezca que las nuevas mejoras de eficiencia energética vayan más allá del 2020”.

La eficiencia energética de los edificios, tiene como objetivo el que todos los edificios de la administración pública sean de consumo casi nulo a partir de 2018 y para los edificios nuevos a partir del 2020, lo que está obligando a revisar la anterior normativa con el objetivo de alinear los objetivos estratégicos bajo el concepto 20/20/20.

En esta directiva, se definen objetivos concretos de reducción del consumo como son fundamentalmente los elementos de aislamiento y de uso pasivo, que confluyen en la obtención de ahorros energéticos.

Para alinearse con los objetivos establecidos en la anterior Directiva, es necesaria una modificación progresiva al alza de los actuales requisitos de aislamiento establecidos en CTE (Código Técnico de Edificación). Además y dado que actualmente no existe un indicador directo relativo a la demanda energética de edificaciones (edificios e instalaciones), se elimina la opción simplificada del cálculo de transmitancia⁴ de los elementos constructivos y se habla directamente de demanda Energética, alineándose, así también con los requisitos establecidos en la legislación por la que se aprobó el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de edificios.

4. MODOS DE TRANSMISIÓN DEL CALOR

El calor puede transferirse por conducción, por convección, por radiación, o por una combinación de los tres modos. El calor siempre se mueve de las zonas más calientes a las más frías, buscando el equilibrio térmico, cuanto mayor es la diferencia de temperaturas, más rápidamente fluye el calor hacia la zonas más fría, incrementado el gasto energético derivado de los equipos de refrigeración.

La transmisión del calor se produce desde el exterior hacia el interior, precisando por ello, de un elemento que actúe de barrera de contención y elimine en cierta medida la acción que la climatología efectúa sobre los diversos materiales. Para obtener un resultado óptimo, adecuado, se ha considerado adecuado su aplicación en capas de 1 mm. aproximadamente una RT 0,287.

Conducción. Es la transmisión de energía calorífica, de molécula a molécula, a través de un material, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Para que el calor se transmita por conducción, deberá haber contacto físico entre partículas y cierta diferencia de temperatura. Así, la conductividad térmica es la medida de la velocidad a la que el flujo de calor pasa de una partícula a otra. La tasa de flujo de calor a través de un material específico estará determinada por la diferencia de temperatura y la conductividad térmica del material.

Convección. Es la transmisión de calor debida al movimiento del aire (o un gas) o un líquido calentado de un lugar a otro, llevando consigo el calor que contiene. La tasa de flujo de calor varía en función de la temperatura del gas o líquido en movimiento y de su caudal.

Radiación. La energía calorífica se transmite en forma de luz, como radiación infrarroja u otro tipo de ondas electromagnéticas. Esta energía emana de un cuerpo caliente y sólo puede transmitirse libremente a través de medios completamente transparentes. La atmósfera, el vidrio y los materiales translúcidos dejan pasar una cantidad significativa de calor radiante, que puede ser absorbido cuando incide en una superficie: por ejemplo, la superficie de la cubierta del barco en un día soleado absorbe calor radiante y se calienta.

4 La palabra transmitancia no está en el Diccionario. (ver 3).




En la práctica, la infiltración de calor es el resultado de una combinación de los tres modos mencionados, pero el modo de transmisión más significativo es por radiación a través de las paredes y el suelo.

Uno de los elementos más importantes en el coste que supone la reducción de ahorro energético, la componen los tejados convencionales que pueden absorber el 90% de la energía solar incidente pudiendo alcanzar temperaturas de hasta 70°C.

Para un cerramiento simple, de caras plano paralelas⁵, formado, por un material homogéneo de conductividad térmica λ y espesor L , con coeficientes superficiales de transmisión de calor h_i y h_e el coeficiente de calor K , viene dado por la expresión:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e}$$

Los valores $1/h_i$, $1/h_e$ y $1/h_i + 1/h_e$ que debe estimarse para los cálculos, en función de la posición del cerramiento y del sentido del flujo de calor, y de la situación del cerramiento.

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor	Situación del cerramiento de separación con espacio exterior o local abierto	De separación con otro local o cámaras de aire					
		$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal > 60° y flujo horizontal		0,13 (0,11)	0,07 (0,08)	0,20 (0,17)	0,13 (0,11)	0,13 (0,11)	0,26 (0,22)
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal < 60° y flujo secante		0,11 (0,09)	0,06 (0,05)	0,17 (0,14)	0,11 (0,09)	0,11 (0,09)	0,22 (0,18)
Cerramientos horizontales y flujo descendiente		0,20 (0,17)	0,08 (0,05)	0,26 (0,22)	0,20 (0,17)	0,20 (0,17)	0,40 (0,34)
Resistencias térmicas superficiales en m ² h °C/kcal (m ² °C/W)							

En cambio, en cerramientos compuestos, formados por una serie de láminas plano paralelas⁶ de distintos materiales, el coeficiente K del conjunto se obtiene de la fórmula siguiente:

$$\frac{1}{K} = \sum \frac{L}{\lambda} + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right)$$

Donde el $\sum \frac{L}{\lambda}$ es la suma de las resistencias térmicas de las diferentes láminas que conforman el cerramiento.

En el caso de que el cerramiento tenga heterogeneidades regularmente repartidas, pero importantes (huecos en los ladrillos y bloques), en el cálculo de K puede introducirse el concepto de resistencia térmica útil R por unidad de superficie, quedando la expresión, en:

⁵ Separar en "planos paralelas".

⁶ Separar en "planos paralelas". es un medio homogéneo de índice de refracción n , limitado por dos superficies planas paralelas, situado en otro medio de índice de refracción n

$$\frac{1}{K} = \Sigma R_v + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right)$$

En contraste, la aplicación de los tejados fríos, consideramos que absorben menos del 50% de la energía incidente del sol, reduciendo la temperatura del tejado y disminuyendo las necesidades de acondicionamiento de aire en el interior, como hemos comentado anteriormente, tanto en edificaciones, como en armarios instrumentados, casetas equipadas, instalaciones fijas sometidas a fuertes temperaturas, naves industriales, almacenes, depósitos de combustibles o GLP'S, instalaciones agrícolas y ganaderas, y en especial en obra civil.

Es por tanto, a nivel industrial y de equipamiento donde pueden obtenerse mejores resultados, pero su uso tanto en obra civil, edificaciones residenciales, polígonos industriales (talleres o naves), silos de gránulos, grandes depósitos de GLP's, transformadores eléctricos, etc.

El uso de este tipo de elementos, pintura de recubrimiento reflectante produce el efecto siguiente:

- * Reducción del consumo de energía.
- * Mejora del confort térmico, reduciendo la oscilación térmica.

* Reducción de la temperatura tanto superficial (exterior), como la interior que soporta la instalación (edificio, armario, etc), aumentando así su vida útil de equipos e instalaciones, ya que los materiales reducen el riesgo de choques térmicos (estrés).

Esta situación permite que las superficies tengan la capacidad de reflejar la mayor parte de la radiación solar recibida y además emiten de forma eficaz un alto porcentaje de la radiación solar absorbida, de forma que se evita el calentamiento de dichas superficies y por tanto, disminuyendo de manera significativa el calor transmitido al interior de las instalaciones fijas sometidas a fuertes temperaturas, como, naves industriales, almacenes, depósitos de combustibles o GLP'S, instalaciones agrícolas y ganaderas, y en especial en obra civil, etc.).

5. QUÉ ES LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica se representa por la letra griega λ y es el coeficiente que cuantifica la cantidad de calor por unidad de tiempo que atraviesa una unidad de superficie de un material con espesor definido, cuando entre sus caras hay una diferencia de temperatura de un grado. Es un valor intrínseco de cada material. Sus unidades son:

$$W / m \cdot K \text{ o } Kcal / h.m.^{\circ}C \text{ (1W = 0,86 Kcal/h)}$$

Los aislantes propiamente dichos, presentan valores muy bajos de conductividad y aíslan térmicamente de un modo diferente para cada uno de ellos.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA W/M K
Hormigón	1,63 - 2,74
Ladrillo macizo	0,72 - 0,90
Ladrillo hueco	0,49 - 0,76
Maderas	0,10 - 0,21

La idea es que el aislamiento térmico, no es un gasto, sino una inversión, puesto que el desembolso inicial, se ve compensado en un breve plazo, a través del ahorro energético, tanto en calefacción como en refrigeración. Y en el largo plazo, en la prolongación, de la vida útil de los materiales de la instalación.

Pero ¿qué tipo de aislamiento produce el máximo retorno económico?, sencillamente, el correcto estudio del dimensionamiento de la instalación, en función de una serie de variables como son: La climatología local, el sistema constructivo elegido, el coste, las prestaciones térmicas del tipo de aislamiento escogido, y en general, todos aquellos elementos que contribuyan a prolongar su vida útil.

En los sistemas constructivos, los diversos grados de inercia térmica y ventilación se adecuan en mayor o menor medida a las propias necesidades de dimensionamiento estructural, incorporando espesores crecientes de aislamiento térmico, o incluso incorporando la posibilidad de que el propio aislamiento cumpla un papel adicional importante, como capa protectora de la estructura o de otros materiales.

La relación entre prestaciones térmicas / coste de aislamiento será, en definitiva, quien nos dará, la determinación de la capa de aislamiento mas económica. Por tanto, cabe preguntarse entonces, cual debe de ser la condición que determine el tipo de aislamiento. Por un lado, la ley de rendimientos decrecientes, o la propia funcionalidad y expectativas de durabilidad.

En el caso de la península española, (mapa de radiación solar), dependiendo de la zona climática, precisa de una solución constructiva y un tipo de aislamiento diferente, (los espesores medios habituales en edificación, se mueven en el intervalo de 2 a 6 cm).

La aplicación de las directivas europeas sobre eficiencia energética de los edificios (Directiva 2012/27/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, fue publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea el 14 de noviembre de 2012) (2) y la norma europea de cálculo de necesidades de calefacción (UNE: EN 832), determina que como media, esos espesores se pueden duplicar al intervalo de (4 y 12 cm.), permaneciendo por debajo del máximo definido para el espesor económico.

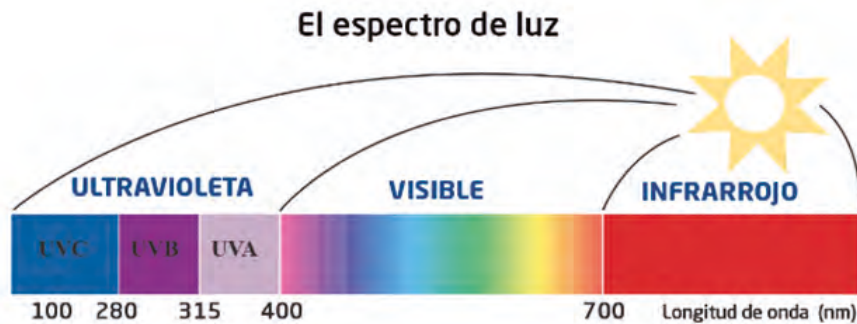
6. ¿QUÉ ES LA PINTURA DE RECUBRIMIENTO REFLECTANTE?

La pintura de recubrimiento reflectante es una capa de protección, cuya característica principal es la reflectancia⁷ de los rayos solares, proporcionando una barrera de aislamiento en las superficies aplicadas. Esta barrera la proporciona, la integración en su interior de microesferas de cerámica, las cuales crean una cámara de aire, que produce una ruptura de puente térmico, y provoca un aislamiento del exterior, con una caída de temperatura entre las superficies tratadas y las no tratadas.

Posee un coeficiente de conductividad térmica (λ) de 0,056 W/mK de acuerdo a la Norma UNE 92202: 1989 Materiales aislantes térmicos. Determinación de la conductividad térmica. (Técnica del medidor de flujo de calor).

Este coeficiente tan bajo consigue que esta pintura sea fuertemente aislante y su determinación ha sido demostrada en diferentes ensayos tanto de índole pública como privada. (3).

⁷ La palabra refractancia no está en el Diccionario. cambio de velocidad y dirección de una radiación al pasar un medio de distinta densidad Podría cambiarse por Reflectancia: es el porcentaje de luz reflejada por unidad de superficie.



La capacidad de aislamiento está tanto en la conductividad térmica de la pintura como en el espesor de la aplicación que se utiliza, 1 mm., suficiente para que los datos de conductividad térmica que aparecen en las pruebas, tanto de casetas de obra, como de armarios equipados, correspondan a ambos efectos, tanto al efecto de las esferas huecas de vidrio que lleva el recubrimiento, como a su espesor (a mayor número de capas, mayor efectividad).

Si una superficie es capaz de reflejar y emitir la mayor parte de la radiación solar incidente, esta superficie no se calentará y por lo tanto se mantendrá más fría, no transmitiendo el calor producido por la radiación solar hacia el interior. Este es nuestro caso, como puede verse en los diferentes ensayos llevados a cabo.

7. DESARROLLO DE LA PRUEBA

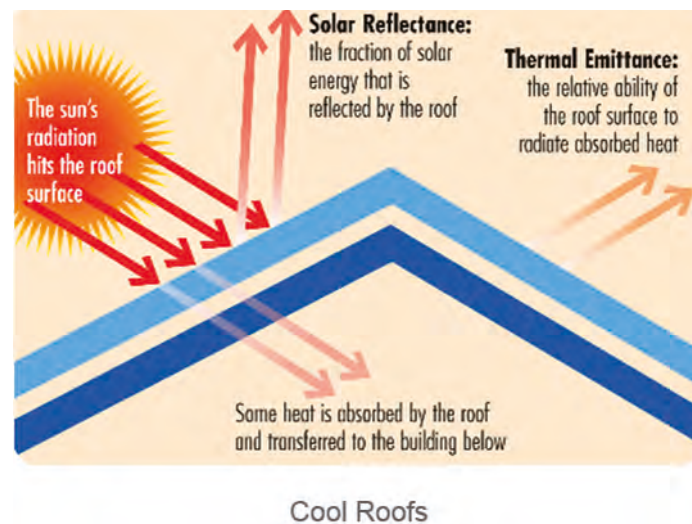
El presente estudio de eficiencia energética está basado en estudiar/comprobar el comportamiento de las temperaturas exterior/interior, de la caseta y armarios a la intemperie, durante los meses de mayor impacto térmico (finales de junio/julio/agosto/septiembre de 2016), en la verificación de la eficiencia (disminución de las temperaturas interiores, respecto a los armarios no pintados) y el ahorro energético (reducción en el consumo de energía por refrigeración) que supone, la aplicación de la pintura de recubrimiento reflectante.

Las pruebas para verificar la mejora, se han realizado sobre el diferencial térmico (Temp. Amb.Externa - Temp.Amb.Interna), en primer lugar en casetas de obra con equipos de comunicaciones, se analiza la amplitud térmica dentro de la caseta, al proporcionar los equipos de refrigeración una temperatura controlada (entre los 22° y los 26°), en segundo lugar en armarios a la intemperie equipados con electrónica. y señalización de FFCC., en tercer lugar en armarios de intemperie con fibra óptica y equipos de medida y por último, en cofres de aire acondicionado situados en el techo de las UT's (Ferrocarriles de la Generalidad Valenciana).

En este estudio, no se han utilizado, otros aditivos para modificar las características químicas de la pintura, sin embargo, si puede aclararse ligeramente, utilizando los colores oscuros, o abrillantar las pinturas con tonalidades claras, así como, elevar sutilmente la viscosidad y aumentar el tiempo de secado, ya que retardan el entrecruzamiento polimérico.

Su uso, así como el color elegido (4), está diseñado para mantener bajas temperaturas en la superficie donde la luz del sol está incidiendo directamente sobre ellos. (La luz solar es el principal factor que causa el calentamiento en los materiales a la intemperie).

La pintura utilizada está certificada ISO 14001. Esta certificación valida el control y la reducción de los impactos medio ambientales tanto en el proceso de fabricación, como en la prolongación de la actividad al exterior (expedición, transporte, embalaje, reciclaje).



8. CARACTERÍSTICAS DE LA PINTURA

La pintura de recubrimiento reflectante, es una pintura ecológica, que al secar presenta propiedades de reducción térmica evitando que los rayos solares calienten las superficies donde incide. En todas las pruebas se ha utilizado una sola mano de esta pintura, tanto en las paredes y techos, del edificio de obra civil y en los laterales y la cubierta de los armarios equipados, con el fin de conseguir un impregnación homogénea para un aislamiento térmico de larga duración, (diez años mínimo, con un sistema de mantenimiento adecuado).

Las características más importantes que definen la pintura de recubrimiento reflectante:

- **Ahorro de energía de los equipos de refrigeración (calor/frío).** Aislamiento térmico eficaz, consiguiendo un ahorro de energía tanto en frío como en calor. Favorece el ahorro energético en instalación (edificios industriales, edificaciones residenciales, armarios equipados, etc), ya que nos permite reducir en gran medida las pérdidas de calor y frío que se pudiesen suceder (reduce la amplitud térmica).
- **Eficacia y durabilidad.** La pintura, no supone un elemento añadido de conservación de las instalaciones, proporcionando una durabilidad aproximadamente 10 años con un sistema óptimo de conservación, sin perder sus propiedades.
- **Anti humedades por condensación.** Previene humedades, dado que el puente térmico es la causa de las humedades por condensación, en paredes y juntas.
- **Impermeabilizante.** Por sus características esta pintura es resistente al agua de lluvia y a las humedades producidas por fenómenos atmosféricos. Su baja permeabilidad al agua y una alta resistencia a su absorción, hacen que se reduzca la condensación de vapor de agua, evitando la corrosión y el deterioro.
- **Previene el moho.** El moho en paredes y techos suele ser consecuencia de las humedades, no obstante, las características propias de la pintura evitan este nocivo efecto. No se ve afectado, por la aparición de hongos, de mohos, o atracción de parásitos.
- **Reduce el ruido exterior.** Capacidad aislante de ruido, elimina el repiqueteo producido por los efectos atmosféricos.
- **Ecológica.** Mejora medioambiental de las instalaciones, no genera, ni absorbe olores Respeto el medioambiente.

- **Fácil aplicación.**
- **Material aislante con baja conductividad térmica (capa óptima 1 mm.).** Buenas propiedades termo aislantes (aislante térmica)..
- **No tóxico.** Esta pintura no es toxica en su uso, se puede pisar y es transitable.
- **No se quema ni se inflama.** La pintura de recubrimiento reflectante, mono-componente tiene su base acuosa. Pintura con alta resistencia al fuego. El producto en su forma inicial, no es inflamable y no desprende vapores inflamables.
- **Fácil aplicación/manipulación.** No precisa de equipos especiales para su aplicación.
- **Reducción del arco de amplitud térmica.** La aplicación de la pintura reduce de manera considerable el rango de valores (Max. - min.).
- **Reducción de la caída térmica.** El valor mínimo alcanzado en el interior, se mantiene estable por encima de los valores de la temperatura exterior.
- **Económico.** Tanto en términos de inversión inicial, como por su rentabilidad a largo plazo. Adaptación a un tipo de aplicación eficaz, fácil y económica.
- **Baja densidad**

La gran innovación de esta pintura viene dada por su composición, ya que integra una serie de micro-esferas cerámicas, las cuales crean una cámara de aire produciendo una ruptura de puente térmico, provocando un efecto escudo.

Esta pintura rompe el choque térmico y evita condensaciones, funciona por es capaz de reflejar y emitir la mayor parte de la radiación solar incidente, evitando el calentamiento de las superficies tratadas y manteniéndolas a temperaturas inferiores, a las no estuvieran protegidas. Por tanto, el ahorro energético que puede producir, será distinto en cada caso particular dependiendo de las condiciones propias de cada aplicación en el “Mapa de zonas climáticas de España” (Mapa de radiación solar).

Está claro que si pintamos la cubierta de dos naves iguales con grandes portones de entrada, en una de ellas los portones están siempre abiertos, y en la otra cerrados. Lógicamente, la nave que mantiene los portones cerrados, tendrá un ahorro energético mayor o mantendrá más fresco el interior que la que mantiene los portones abiertos con entrada de aire caliente hacia el interior.

- **Ensayo de conductividad térmica**

Determinación de coeficiente de conductividad térmica del material según la norma UNE 92202:1989 para saber cómo se comporta este material frente al flujo de calor.

Resultado:

El coeficiente resultó tener un valor de 0,056W/m*K, mucho mejor que el de la pintura acrílica.

- **Ensayo de aislamiento**

Se comparara el aislamiento térmico de la pintura decorativa convencional con el de nuestra pintura térmica para ver las diferencias reales entre ambas.

La diferencia de energía aplicada por volumen de aire (1 m³) demuestra que se consigue un ahorro de 1843 cl. de energía al enfriar una habitación.

Pintando techos y paredes, perimetrales se puede ahorrar más de 10% un de energía.

- **Estudio termográfico (Ensayo propio)**

Se realizó una prueba de aislamiento térmico en superficies planas para comprobar la efectividad de la pintura térmica cuando índice en ella la luz. Se usaron focos de radiación lumínica, equivalente a 1.000 Wts m/2 /seg.

Resultado:

Similar al del estudio independiente, viendo enormes diferencias entre el uso de la pintura térmica y su ausencia.

- **Pruebas de reducción de temperatura**

Desde el principio, se consideró necesario realizar pruebas de aplicación efectiva en las instalaciones, y comprobar la eficacia en la mejora térmica en casetas de obra civil dotada de equipos de Telefonía GSM, en armarios electrónicos equipados y en cofres de aire acondicionado de UT's, donde la aplicación de la pintura térmica (recubrimiento reflectante), puede proporcionar un diferencial de eficiencia térmica excelente.

Este tipo de pintura de recubrimiento reflectante, supone un avance significativo en el control del estrés térmico de los materiales y favorece la reducción térmica de los mismos, mejora, con ello, las prestaciones en edificios e instalaciones fijas a la intemperie (casetas técnicas y armarios equipados y resto de instalaciones civiles o industriales).

El producto del ensayo viene marcado como (4) CE nº 4198, y se presenta como un "Revestimiento Aislante Impermeabilizante para cubiertas y tejados" para todo tipo de materiales y soportes, capaz de reducir la temperatura interior de casetas en climas muy cálidos afectados por el sol (reflectancia solar). de color blanco.

La información facilitada por fabricante indica que la base del producto es acrílica, con partículas esféricas huecas que son las que proporcionan su alta capacidad aislante. Esto se traduce en un diferencial térmico de 8-18° de temperatura entre el interior y exterior.

La técnica que usa el producto para originar la mejora térmica se basa en dos efectos:

- Efecto aislante térmico de las esferas de vidrio, que evita que la energía penetre en el muro.
- Mejora del Índice de Reflexión Solar (SRI) ó Reflectancia de la radiación solar de la superficie tratada.

Nota:

La caseta tiene una puerta RF90 de chapa galvanizada y pintada en verde de 0,30x0,825-1,67m²

Tiene dos equipos de aire acondicionado encajados a las paredes menores.



Caseta de operadores en boca túnel lado Madrid PK385+100

9. PRIMER CASO

Se planificó la realización de una prueba piloto, sobre una construcción de obra civil, consistente en la protección de una caseta de hormigón H-350 ubicada en las proximidades del Término Municipal de TORRENT en Valencia, aplicando la pintura la revestimiento aislante impermeabilizante (TECMA PAINT TERMIC FAHRENHEIT 10.8) con el objetivo de evidenciar los beneficios de esta solución desde un punto de vista de ahorro energético, por la reducción de la amplitud térmica en el interior de la caseta, en periodo estival, dado que dicha caseta requiere climatización (refrigeración interior) para mantener una condiciones óptimas de funcionamiento de la instrumentación.

Como parte del programa establecido para la ejecución de dicha prueba piloto, se inicia el día 20 de Junio de 2016 se desplazo un equipo desde Madrid a la caseta a fin de realizar la instrumentación con los equipos de medición y control de temperatura que se utilizarán para determinar los valores.

Se utilizan equipos por duplicado (sondas térmicas de registro continuado de temperatura y humedad (1) Tinytag Ultra 2 Temperature / (2) Relative Humidity Logger (Mod. TGU - 4500), tanto para controlar la temperatura interior de la caseta como para controlar la temperatura ambiente exterior.

Tras analizar las diferentes posibilidades de ubicación, se determinan los emplazamientos y se ubican los diferentes registradores de temperatura. Se decide ubicar próximos los equipos para evitar una distorsión de los datos obtenidos, de forma que ambos equipos estén sometidos a las mismas condiciones ambientales.



Caseta

Ubicación externa

Ubicación interna

Dado que las casetas requieren climatización interior para su adecuado funcionamiento, y no es posible desconectar dicha climatización durante la realización de la prueba piloto, para evaluar los beneficios proporcionados por la protección de la caseta con la pintura de recubrimiento reflectante, se controlará el consumo energético y las horas de funcionamiento de dicha climatización en las dos situaciones planificadas: situación actual existente (desde el 20/06/2016 al 30/06/2016), y tras proteger con el revestimiento elegido (01/07/2016 al 09/07/2016).

La planificación de la aplicación de la pintura revestimiento sobre techo y paredes de dicha caseta se sitúa en el día 30 de Junio de 2016, por lo cual se tomarán datos de los días anteriores para determinar la situación de partida previa a la protección, y de la misma forma, se tomarán los datos de los días inmediatamente posteriores a dicha aplicación para evaluar la influencia de dicha protección. Se ha previsto que los registradores fueran retirados el día 11 de Julio de 2016.

Los registradores ubicados en el exterior controlarán la temperatura externa ambiental cada 15 min., y los registradores ubicados en el interior del armario harán lo mismo con la temperatura en el interior del armario, cuya principal finalidad será verificar que dicha temperatura interior no supera los 28 °C que están establecidos para la activación del equipo de climatización como temperatura máxima.

Así mismo, se toman las mediciones de los consumos eléctricos para comprobar como afecta la aplicación de la pintura al posible ahorro energético, tanto por la resistencia térmica de la pintura como por la reflectancia del producto aplicado (efecto escudo).

Las condiciones ambientales de ambas pruebas, han diferido, dado que las condiciones atmosféricas obtenidas durante la última semana de Junio de 2016, donde los valores máximos exteriores superaron valores próximos a los 32,1°C y a partir del 1 de Julio las temperaturas exteriores si superaron este valor hasta alcanzar valores de hasta 37,1°C., superando por tanto los valores en irradiación solar, viento, y humedad.

La elección de las pruebas en el edificio técnico (caseta de operadores) donde se realizan las medidas de mejora térmica, se determinó como consecuencia de que tiene una mayor superficie, un mayor impacto solar, y un mayor consumo de energía interno.

Las pruebas se realizaron en la caseta MPV16B por ser la ubicación más cálida de la línea Madrid - Castilla La Mancha - Comunidad Valenciana, que es uno de los puntos donde se registran temperaturas más altas, por el clima de la zona, y por estar este edificio al abrigo de la entrada del túnel Torrent (Valencia) lado Madrid.

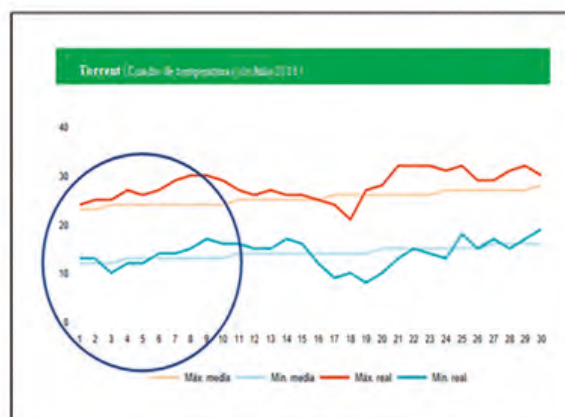
CASETA DE OPERADORES: MPV16B	
PK de Vía	386+100 (Lado Vía 2)
Zona	Torrente - próximo a túnel Torrente (Valencia)
Coordenadas (GMS)	39°26'36.67"N 0°29'22.90"O
DATOS DE LA CASETA DE OPERADORES	
Superficie de cubierta=	8,50x2,650 = 22,52 m ²
Superficie lateral grande=	(8,50-0,220)x2,515 = 20 m ²
Superficie lateral menor=	2,430x2,515 = 6,11 m ²
Superficie total OPE=	Scubierta + 2xSlat1+ 2xSlat2 = 22,52 + 2x20 + 2x6,11 =74,74 m ²

Torrente (Cuadro de temperaturas medias 26 de Junio - 09 de Julio / 2016)

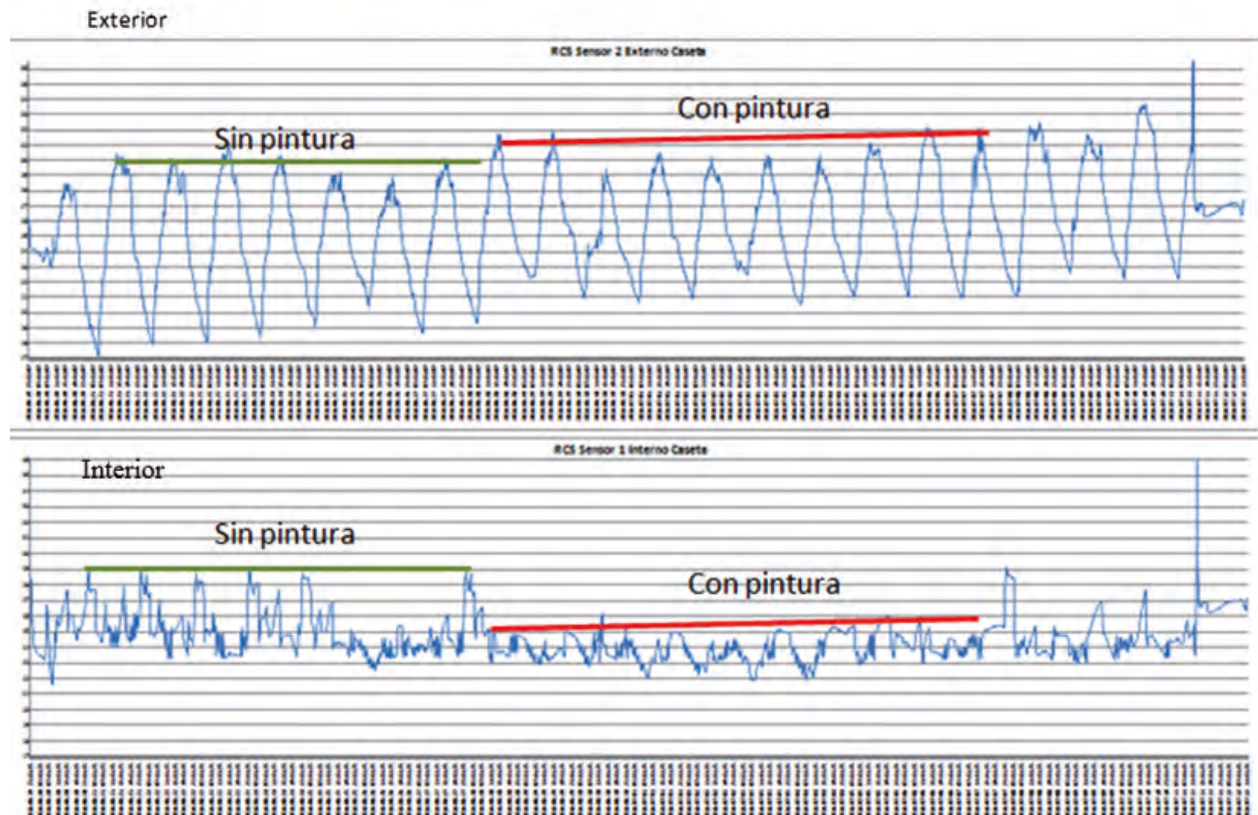
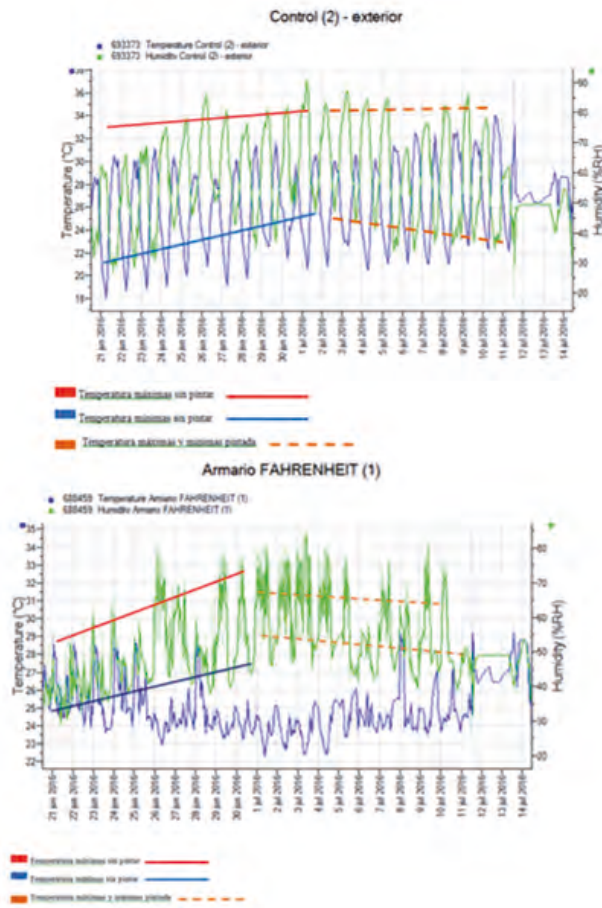
DO. 26/06 Temp. real 25°/13° Media histórica 25°/15°	LU. 27/06 Temp. real 29°/12° Media histórica 25°/15°	MA. 28/06 Temp. real 27°/14° Media histórica 25°/15°	MI. 29/06 Temp. real 25°/14° Media histórica 25°/16°	JU. 30/06 Temp. real 23°/13° Media histórica 25°/16°	VI. 01/07 Temp. real 22°/14° Media histórica 25°/16°	SÁ. 02/07 Temp. real 26°/12° Media histórica 25°/16°
DO. 03/07 Temp. real 32°/14° Media histórica 25°/16°	LU. 04/07 Temp. real 31°/17° Media histórica 25°/16°	MA. 05/07 Temp. real 32°/16° Media histórica 25°/16°	MI. 06/07 Temp. real 32°/18° Media histórica 25°/16°	JU. 07/07 Temp. real 29°/17° Media histórica 25°/16°	VI. 08/07 Temp. real 27°/16° Media histórica 25°/16°	SÁ. 09/07 Temp. real 29°/15° Media histórica 25°/16°

Construcción:
con hormigón H-350.

Prefabricada

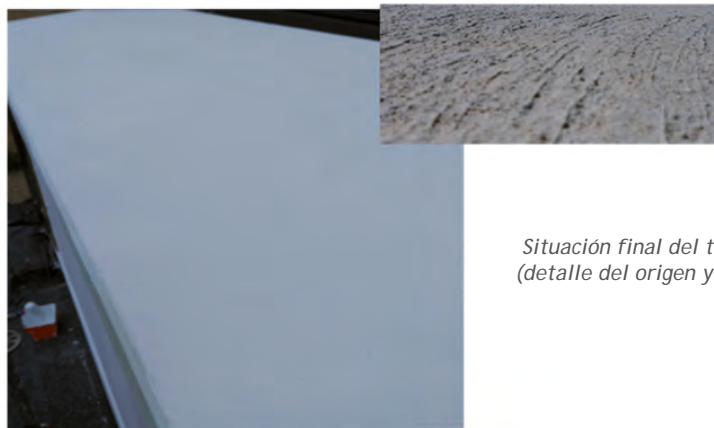


IVM (enlace: <http://www.accuweather.com/es/es/torrente/1450762/june-weather/1450762>)



Detalles de la aplicación de la pintura en la parte superior de la caseta.

Detalle de la superficie superior de la caseta (techo) después de la aplicación de la pintura de recubrimiento reflectante.



Situación final del techo
(detalle del origen y final)

Resumen de temperaturas caseta de obra Torrent (Valencia).

Temperaturas exteriores (temperaturas ambiente)

FECHA (Hora) en que se alcanzan los valores extremos	TEMPERATURAS MÍNIMAS (Exterior)	TEMPERATURAS MÁXIMAS (Exterior)
21-06-2016 – 06:41	17,1° C (sin pintar)	
04-07-2016 – 06:41	20,5° C (pintada)	
29-06-2016 – 16:56		32,1° C (sin pintar)
11-07-2016 – 13:26		37,1° C (pintada)

Temperaturas interiores (actuación del termostato de aire acondicionado 22° - 27°)

FECHA (Hora) en que se alcanzan los valores extremos	TEMPERATURAS MÍNIMAS (Interior)	TEMPERATURAS MÁXIMAS (Interior)
21-06-2016 – 06:41	21,9° C (sin pintar)	
04-07-2016 – 06:41	22,0° C (pintada)	
29-06-2016 – 14:41		29,1° C (sin pintar)
11-07-2016 – 14:41		25,1° C (pintada)
Valores medios (* datos)	24,9° C (sin pintar)	23,40° C (pintada)
Amplitud térmica (max – min)	7,2° C (sin pintar)	3,1° C (pintada)

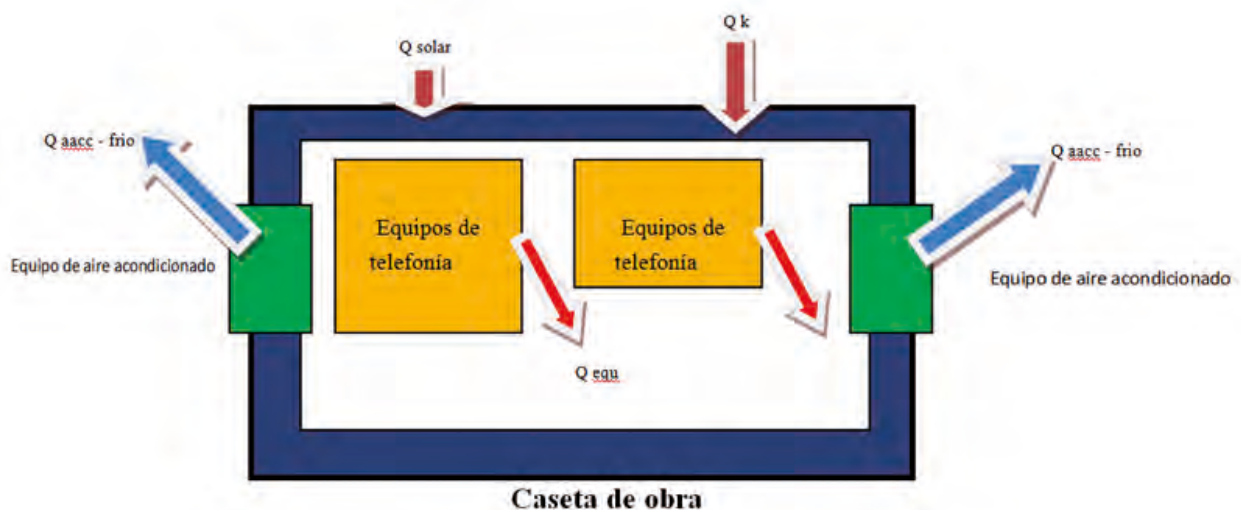
(* datos) 2121 valores. Se incluyen las tablas como anexo caseta de obra de Torrent (Valencia).

Nota de cálculo:

La Energía solar impacta en la caseta con una potencia de $980\text{W}/\text{m}^2$. Si el rayo incidente no es perpendicular la potencia será $P_{\text{solar}} = 980 \cdot \text{Superficie} \cdot \text{Sen } \alpha$. Siendo α el ángulo entre el rayo incidente y el plano de la superficie.

La reflectancia Solar SRI de la caseta con pintura térmica es próxima al 107%, y es mayor a reflectancia de caseta sin pintura. Por tanto la energía solar entrante “sin pintura” a través de la pared debe ser mayor ó igual que la Energía con pintura. Calcular los valores de energía solar sería arduo por lo que valoramos la energía solar a partir de las otras tres: Energía AACC+Energía Conducción+Energía equipos refrigerados.

Por tanto, en la ecuación: $Q_{\text{solar_sin pintura}} \geq Q_{\text{solar_con pintura}}$



Coefficiente de transmisión de calor (U) ($\text{kcal}\cdot\text{m}\cdot 2\cdot\text{h}\cdot 1\cdot^\circ\text{C}\cdot 1$)

Temperatura exterior $T_e = \text{Temperatura } t_e = \text{tiempo } T_e \times t_e$ es la λ_e

Temperatura interior $T_i = \text{Temperatura } t_i = \text{tiempo } T_i \times t_i$ es la λ_i

Cuando la caseta esta sin pintar, cada grado de incremento de la temperatura exterior, supone un incremento de la temperatura interior que depende del aislamiento. Cuando la caseta está pintada, cada grado de incremento de temperatura, supone un incremento de temperatura menor, dado que al aislamiento hay de añadir el coeficiente de reflectancia, que será mayor a medida que haya un incremento de SRI (*).

10. SEGUNDO Y TERCER CASO

Se somete a ensayo dos armarios metálicos de instrumentación: uno protegido con revestimiento y otro sin proteger. Y se utilizan para ello dos instalaciones diferentes, una en Pinar de Antequera

(Valladolid) y otra en el Centro de Eficiencia Energética en Santa Catalina (Madrid), en cada uno de ellos se toman dos muestras, uno con el armario pintado y el otro con la pintura original verde corporativo.

El objeto del ensayo es verificar las diferencias de temperatura interiores registradas entre el armario protegido y el armario sin proteger cuando ambos son sometidos a las mismas condiciones de insolación exterior. Ambos armarios se ubican en una zona exterior sometida a fuerte insolación.

La temperatura interior de ambos armarios es controlada por medio de unos registradores de temperatura portátiles ubicados en el interior de ambos armarios, registrando los valores de temperatura interior a intervalos de 30 minutos.

La pintura térmica de recubrimiento reflectante, tiene como principal propiedad la de reflejar la mayor parte de la radiación solar incidente, gracias a los altos valores de SRI (Solar Reflectance Index), siendo capaz de mantener las superficies más frías y por lo tanto contribuir a evitar el calentamiento de las superficies y a mejorar las condiciones en el interior de las mismas.

Definiciones:

El parámetro que representa la medida del grado de enfriamiento de una superficie es SRI (Solar Reflectance Index)

- Índice SRI (ASTM E 1980-01) Coeficiente de convección bajo (0 - <2 m/s)
- Índice SRI (ASTM E 1980-01) Coeficiente de convección medio (2 o >2 - <6 m/s)
- Índice SRI (ASTM E 1980-01) Coeficiente de convección alto (6 o 10>2 - <6 m/s)

Se utilizaron dos equipos de medida, exactamente iguales:

Tinytag Ultra 2 Temperature/Relative Humidity Logger (-25 to +85°C/0 to 95% RH), Modelo: TGU-4500

- Ref. 1 - Nº Serie: T3151 - Calibración del fabricante: 07/07/2016 - 06/07/2017.
- Ref. 2 - Nº Serie: T3152 - Calibración del fabricante: 07/07/2016 - 06/07/2017.

DATOS:

Armarios en el Laboratorio de Eficiencia Energética Santa Catalina (Madrid)

- Temperatura interior de los armarios.
- Características del armario de chapa.
Dimensiones (alto 195cm x ancho 70 cm x fondo 40 cm).
- Sistema de ventilación pasiva (ventilación de rejilla para evitar acumulación térmica).
- Material chapa galvanizada.
- Espesor de la chapa.

En todos dos casos, (), la pintura térmica de recubrimiento reflectante, ha reducido la temperatura en el interior de los armarios, de manera directa, consiguiendo una considerable reducción en la “oscilación térmica” en el interior de los armarios una vez la aplicada la pintura. Esto supone, por un lado un considerable ahorro energético, como consecuencia de las propias propiedades los valores están referenciados a las mismas fechas de la pintura, una prolongación de la vida útil de los equipos electrónicos y una reducción de fallos, ante variaciones importantes de la temperatura.



Equipos de medida



Foto 1

Foto 2

Resumen de temperaturas armario pintado Pinar de Antequera.

	T (°C) interior armario sin proteger	T (°C) interior armario protegido con TECMA PAINT FAHRENHEIT	$\Delta T = T$ armario sin proteger - T armario protegido (Máxima)
Inicio periodo registro	12/07/2016 (14:00 horas)	12/07/2016 (14:00 horas)	
Final periodo registro	22/07/2016 (14:30 horas)	22/07/2016 (14:30 horas)	
Número de mediciones	482	482	
Valor máx. registrado	50,7 °C	38,3 °C	15,6 °C
Valor mín. registrado	10,8 °C	12,3 °C	
Oscilación térmica	39,9º C	26,0º C	

Resumen de temperaturas en armario pintado Laboratorio de Eficiencia Energética Santa Catalina

	T (°C) interior armario sin proteger	T (°C) interior armario protegido con TECMA PAINT FAHRENHEIT	$\Delta T = T$ armario sin proteger - T armario protegido (Máxima)
Inicio periodo registro	19/07/2016 (14:00 horas)	19/07/2016 (14:00 horas)	
Final periodo registro	06/09/2016 (10:00 horas)	06/09/2016 (10:00 horas)	03/08/2016 13 .00
Número de mediciones	2345	2345	
Valor máx. registrado	52,9 °C	40,1 °C	16,5 °C
Valor mín. registrado	17,5 °C	17,1 °C	
Oscilación térmica	35,4º C	23,0º C	

En todos los casos, las diferencias de temperaturas, de los armarios una vez aplicada la pintura supusieron reducciones cuyos valores máximos de 16,5° C. en el caso de los armarios de intemperie equipados de Pinar de Antequera (Valladolid) y de 15,6° C. en el caso de los armarios de intemperie del Laboratorio de Eficiencia Energética.

No obstante, y dado que ninguno de dichos armarios están dotados de equipos de refrigeración forzada, sino, por simple rejilla de ventilación directa y equipos de disipación interiores.

Su ahorro energético, viene dado por la parte de la eficiencia, al mantener sus temperaturas interiores en valores menores a los máximos alcanzados, y una oscilación térmica con un arco de menor rango.

Hay un dato muy significativo, el de la “caída térmica” (valor mínimo alcanzado en el interior

del armario, cuando la temperatura exterior es mínima). Cuando el armario está pintado, la “caída térmica” es menor, que cuando no lo está. Por tanto la estabilidad de la temperatura permite establecer: Ahorro energético, disponibilidad eficiente de los equipos instalados en el interior de los armarios, y prolongación de la vida útil de los mismos.

11. CUARTO CASO: COFRES DE AIRE ACONDICIONADO DE TRANVIAS SIEMENS DE LA SERIE 3800

El departamento de material motor de FGV (Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana) ha realizado una prueba durante la última semana de julio/2016, aplicando la pintura térmica de recubrimiento reflectante en los cofres de aire acondicionado de las unidades Siemens de la serie 3800.

Se adjuntan fotografías del cofre pintado y a continuación se relacionan las mediciones obtenidas con dos sondas de temperatura, una colocada en un cofre pintado y otra en el otro equipo de la misma unidad y que no se pintó para observar las diferencias. Además del equipamiento del tranvía podría ser utilizado este producto en instalaciones intemperie como los armarios de los enclavamientos y que en algunas ocasiones alcanzan temperaturas muy elevadas llegándose a bloquear estos sistemas, debido a las altas temperaturas.

Estas pruebas se realizaron en la unidad 3825 de Siemens. Los resultados obtenidos son valores que se tomaban puntualmente.

FECHA	HORA	GRADOS AA. CON PINTURA	GRADOS AA. SIN PINTURA	DIFERENCIA DE TEMPERATURAS	OBSERVACIONES
27-7-2016	10.30 H.	29.50	32	2.50	DIA NUBLADO
28-7-2016	12.47 H.	32.50	38	5.50	SOLEADO
2-8-2016	13.28 H.	33.80	39.80	6.00	SOLEADO
3-8-2016	12.30 H.	32.50	38	5.50	SOLEADO

Se puede observar de los resultados obtenidos en días soleados son más significativos que en el día nublado, dando la mayor diferencia de temperatura de 6 grados, suficiente para que el equipo trabaje en mejores condiciones.

12. CONCLUSIONES

Se consideró como fechas más adecuadas, para el desarrollo los meses de junio, julio y agosto/2016 donde se dan condiciones atmosféricas más extremas, con altas temperaturas.



Unidad Siemens de la serie 3800 con pintura térmica de recubrimiento reflectante.

El objeto principal, era comprobar las propiedades aislantes y de resistencia al calentamiento como efecto de la radiación solar en las instalaciones, con el producto aplicado pintura térmica de recubrimiento reflectante y sin ella.

Se incluyen, las diferentes pruebas que se han realizado:

Caseta de obra en Torrent (Valencia) (pendiente de evaluación final más exhaustiva, al considerar el consumo de energía de alimentación de los equipos de refrigeración).

Durante las fechas (20 de junio - 11 de julio 2016) de realización de las pruebas existe una gran disparidad en los datos de temperaturas atmosféricas, no siendo concluyentes ninguno de ellos. Este comportamiento de las temperaturas ha diferido significativamente, en las fechas donde la caseta estuvo sin pintar, los valores máximos de las temperaturas nunca superaron los 32,1° C, mientras que las temperaturas exteriores con la pintura aplicada, se llegaron alcanzar los 37,1° C, esta disparidad de temperaturas nos hace replantearnos el uso de “estimadores” (valores relativos sobre las base teórica de incremento / decremento de consumo en kw por cada grado que aumenta/disminuye la temperatura), lo que impide un análisis objetivo utilizando solamente los valores absolutos de los datos registrados.

Del mismo modo, las fechas durante las cuales la caseta estuvo sin pintar los valores mínimos de las temperaturas llegaron 17,9° C, mientras que las temperaturas exteriores con la pintura aplicada, no bajaron de los 20,5°C, por tanto, ante la disparidad de temperaturas, se hace necesario que nos replantearnos el uso de “estimadores” igualmente (valores relativos sobre las base teórica de incremento / decremento de consumo en kw por cada grado que aumenta/disminuye la temperatura).

Los valores en el interior de la caseta, tanto sin pintar, como pintada, no varían sustancialmente, porque existe una ventilación forzada (aire acondicionado), por lo que se realizan modelizaciones de los datos (uso de estimadores) para comprobar si el termostato interior le afecta, o no, la temperatura exterior, en cuyo caso, siempre se obtiene una mejora en la eficiencia.

El dato más significativo es la “oscilación térmica” siempre se mantiene en valores inferiores cuando la caseta está pintada.

No obstante, como ya hemos comentado, para el análisis más exhaustivo del consumo de energía, existen varios equipos de trabajo para intentar llegar algún resultado, sobre cuál ha sido la incidencia de la pintura en el consumo de energía y su eficiencia.

El diferencial en el descenso de la temperatura (23,54° C (sin pintar) *) frente a los 22,50° C (con la caseta pintada) *) en temperaturas mínimas y de (27,98° C (sin pintar) *) frente a los (25,32° C (pintada) *) en temperaturas máximas.

Estos valores, dan como resultado un mayor consumo en kw/h, debido sobre todo, al mayor tiempo que se han mantenido activos los equipos de ventilación forzada, La resistencia térmica R de una capa homogénea de material sólido, en metro cuadrado por kelvin y por vatio, viene dada por: $R = \frac{e}{\lambda}$, donde e es el espesor de la capa (m) y λ (lambda) la conductividad térmica del material, W/(K·m). (al no variar los valores de los termostatos de control” cuando se pintó la caseta).

En todos dos casos, la pintura térmica de recubrimiento reflectante, ha reducido la temperatura en el interior de los armarios, de manera directa, consiguiendo una considerable reducción en la “oscilación térmica” en el interior de los armarios una vez la aplicada la pintura. Esto supone, por un lado un considerable ahorro energético, como consecuencia de las propias propiedades de la pintura, una prolongación de la vida útil de los equipos electrónicos y una reducción de fallos, ante variaciones importantes de la temperatura.

En todos los casos, las diferencias de temperaturas, de los armarios una vez aplicada la pintura

supusieron reducciones cuyos valores máximos de 16,5° C. en el caso de los armarios de intemperie equipados de Pinar de Antequera (Valladolid) y de 15,6° C. en el caso de los armarios de intemperie del Laboratorio de Eficiencia Energética.

No obstante, y dado que ninguno de dichos armarios están dotados de equipos de refrigeración forzada, sino, por simple rejilla de ventilación directa y equipos de disipación interiores.

Su ahorro energético, viene dado por la parte de la eficiencia, al mantener sus temperaturas interiores en valores menores a los máximos alcanzados, y una oscilación térmica con un arco de menor rango.

Hay un dato muy significativo, la “caída térmica” (valor mínimo alcanzado en el interior del armario, cuando la temperatura exterior es mínima). Cuando el armario está pintado, la “caída térmica” es menor, que cuando no lo está.

Por tanto la estabilidad de la temperatura permite establecer: Ahorro energético, disponibilidad eficiente de los equipos instalados en el interior de los armarios, y prolongación de la vida útil de los mismos.

Las pinturas de recubrimiento térmico, tiene un efecto inmediato al reflejar la radiación solar y disipan el calor, con el fin de mantener a temperatura estable y relativamente baja en las mismas, y manteniendo un ambiente fresco, de manera que se reduzca el consumo de energía por la utilización de equipos de refrigeración, aumentando la durabilidad de los materiales de construcción, y su mantenimiento, al evitar el envejecimiento o degradación debida a la radiación solar, además de reducir los daños causados por las contracciones y expansiones térmicas, que son consecuencia, principalmente de la radiación infrarroja, que se encarga de producir energía calorífica en un 50 %.

Por último vamos a agrupar las características más importantes que definen la pintura térmica de recubrimiento reflectante:

- Ahorro de energía de los equipos de refrigeración (calor/frío)..
- Eficacia y durabilidad.
- Anti humedades por condensación.
- Impermeabilizante. Previene el moho.
- Reduce el ruido exterior.
- Ecológica.
- No se quema ni se inflama..
- Fácil aplicación / manipulación.
- Material aislante con baja conductividad térmica (capa óptima 1 mm.).
- No tóxico.
- Reducción de la amplitud térmica.
- Reducción de la caída térmica.
- Económico.
- Baja densidad.

Una cualidad importante, es que las superficies tratadas con la pintura de recubrimiento reflectante, disminuyen grandemente el estrés térmico de los materiales, alargando su durabilidad, al no estar tan sometidos a la fatiga producida por las grandes oscilaciones de temperaturas, y los efectos de la radiación solar.



INFORMACIÓN SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA PINTURA UTILIZADA EN EL ESTUDIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA, SOBRE LA REDUCCIÓN DE TEMPERATURA, EN CASITAS DE OBRA, ARMARIOS METÁLICOS DE INTEMPERIE EQUIPADOS CON INSTALACIONES ELECTRÓNICAS E INSTALACIONES DE SEÑALIZACIÓN, TRATADAS CON PINTURA DE RECUBRIMIENTO REFLECTANTE.



EMPRESA	SATECMA
Nombre del producto:	Pintura TECMA PAINT TERMIC Fahrenheit 10.8
Código del producto:	4198 (Uso profesional . Recubrimiento reflectante)
Aspecto:	Pastoso tixotrópico.
Olor:	Débil.
pH.:	8,3 +/- 0,5
Punto de inflamación:	>100° C.
Densidad relativa:	0,89 +/- 0,03
Solubilidad:	Miscible con agua
Viscosidad:	112 +/- 10 kU a 25° C.
Contenido de COV (p/p):	1,5 %
Contenido de COV (g/l):	14,988 g/l
Numero ONU:	No es peligroso al transporte.
Naturaleza:	Dispersión acuosa
Diluyente y disolvente de limpieza:	Agua
Aplicación:	Brocha, rodillo, pistola airless
Temperatura de aplicación:	de +10 a +35° C.
Tiempo de secado superficial (EN ISO 1517):	1 hora
Consumo recomendado:	de 1 a 1,5 l/m ²
Permeabilidad al vapor de agua	So <5 metros
(EN ISO 7783-1/2) Barrera de aire equivalente	Clase I (EN 1504-2) Permeable al vapor de agua
Permeable al agua (EN 1062-3)	<0,1 kg/m ² Impermeable al agua (EN1504-2)
Adherencia sobre soporte de hormigón (EN 1542)	>0,8 MPa
Sustancias peligrosas (EN 1504-2)	Conforme con el aptd. 5.3 (EN 1504-2)
Conductividad de las esferas huecas	0,07 W/m.k.
Color	Blanco
Índice SRI (ASTME 1980-01) coeficiente de Convección bajo (0-2m7s)	107,6
Índice SRI (ASTME 1980-01) coeficiente de Convección bajo (2-6m7s)	108
Índice SRI (ASTME 1980-01) coeficiente de Convección bajo (8-10m7s)	108,4

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Center for Sustainable Energy Systems for the U.S. Department of Energy Building Technologies Program and Oak Ridge National Laboratory under contract DE-AC05-00OR22725. Additional technical support provided by Lawrence Berkeley National Laboratory and the Federal Energy Management Program. Authors: Bryan Urban and Kurt Roth, Ph.D.
2. GCCA (2012). A Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements. Global Cool Cities Alliance, 44pp.
3. ZINZI, M. & AGNOLI, S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. Energy and buildings. In press. 2012.
4. AKBARI, H; POMERANTZ, M. & TAHA, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Solar Energy, 70,295-310.
5. URBAN, B. & ROTH, K. (2010). Guidelines for Selecting Cool Roofs. U.S. Department of Energy. Building Technologies Program.
6. LBNL. (2000). Cool Roofing Materials Database. Lawrence Berkeley National Laboratory. Environmental Energy Technologies Division.
7. AKBARI, H., LEVINSON, R. & RAINER, L. (2005). Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. Energy and Buildings, 37, 1007-1016.
8. BOIXO, S., DIAZ-VICENTE, M., COLMENAR, A. & CASTRO, M. A. 2012. Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. Energy, 38,425-438.
9. KOLOKOTRONI, M. & WARREN, P. 2011. Promotion of cool Roofs in the EU. Technical Guidelines Handbook.: Brunel University and Cool Roofs In the EU. Technical Guidelines Handbook.: Brunel University and Cool Roofs project.
10. ROMEO, C. & ZINZI, M. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian casa study. Energy and Buildings. In Press.2012.
11. SYNNEFA, A. & SANTAMOURIS, M. Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europa: the Cool Roofs Project. Energy and Buildings.
12. XU, T., SANTHAYE, J., AKBARI, H., GARG, V. & TETALI, S. (2012). Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. Building and Environment, 48, 1-6.
13. Diaz Vicente, María Ángeles. Estimación de potenciales ahorros energéticos y beneficios medioambientales para España derivados del uso de control de radiación (“cool roofs”) en los tejados de viviendas . 2016. Universidad Nacional de Educación a Distancia (España). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control
14. ÇENGEL, Y.A. Transferencia de Calor. 2ª ed. McGraw-Hill, 2006. ISBN 978-9701044841. INCROPERA, F.P. y DEWITT, D.P. Fundamentos de la Transferencia de Calor. 4ª ed. Prentice Hall, México, 1999. ISBN 970-17-0170-4.
15. HOLMAN, J.P. Transferencia de Calor. 8ª ed. McGraw-Hill Interamericana de España S.A.U., 1998. ISBN 84-481-2040-X.
16. MILLS, A.F. Transferencia de Calor. Irwin, 1995. ISBN 84-8086-194-0.
17. CHAPMAN, A.J. Transmisión de Calor. 3ª ed. Bellisco. Librería Editorial., 1990. ISBN 84-85198-45-5.

18. KLEIN, S.A. y ALVARADO, F.L., “Engineering Equation Solver Software (EES)”, Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

19. Otras referencias:

California Energy Commission’s Consumer Energy Center.

California Energy Commission’s Cool Colors Project.

Cool Roof Rating Council (CRRC).

Heat Island Group.

Roof Coatings Manufacturers Association.

US Department of Energy’s Federal Energy Management Program Energy Efficient Products.

US Department of Energy’s Cool Roof Calculator.

US Environmental Protection Agency’s Cool Roof Product Information.

US Environmental Protection Agency’s ENERGY STAR Insulation Information.

Políticas Públicas en los Ferrocarriles: La Red Ferroviaria de la Región del Duero

Public Policies in Railways: The Railway Network in Douro Region

Pedro Pinto

Mestre em Economia pelo ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa

André Pires

Mestre em Gestão pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD)

Resumen

El cierre de la red de ferrocarriles del Duero empezó en 1988 con el Plano de Modernização e Reconversão dos Caminhos-de-Ferro (Plan de Modernización y Reconversión de los Ferrocarriles). En las últimas dos décadas y varios planes para los ferrocarriles portugueses, solamente 179 de los 578 kilómetros de la red ferroviaria del Duero tienen servicio. La metodología usada en el trabajo es de carácter cualitativa y se presentan como casos de estudios la línea de Duero y sus ramales de vía estrecha Tâmega, Corgo, Tua y Sabor. Nuestra investigación tiene como principal objetivo caracterizar y describir las razones que llevaron al cierre de la gran mayoría de estos Itinerarios ferroviarios en las regiones de Trás-os-Montes y Duero.

Palabras-Clave: Política Pública, Ferrocarriles Regionales, Región del Duero

Abstract

The closure of the Douro Region railway network began in 1988 with the Plano de Modernização e Reconversão dos Caminhos-de-Ferro 1988-94 (Railways Modernization and Reconversion Plan 1988-94). In the last two decades and after several strategic plans for the Portuguese railway sector, only 179 of the 578 kilometres that formed the Douro Region railway network have still commercial services. Our investigation work has as cases studies the Douro Line and its narrowed gauge tributaries Tâmega, Corgo, Tua and Sabor Lines. The methodology is based on qualitative research and the main goal of our investigation is to understand, describe and explain the reasons that lead to the closure of the majority of these regional lines that served the Trás-os-Montes and Douro regions.

Keywords: Public policy, Regional Railways, Douro Region

1. Introduction

The Douro Line is a regional railway which ensured a longitudinal linkage between the coast, since Porto - Campanhã, and the interior, until the Spanish village of La Fuente de San Esteban. Nevertheless, besides having provided an international linkage, through Barca d'Alva, the line was connected with others that served the regions situated further North of the Douro Region. The narrowed Tâmega, Corgo, Tua and Sabor Lines as well as the Douro Line formed the Douro railway network, which assumed a determinant role in regional mobility and development of Trás-os-Montes, Tâmega, Basto and Douro regions by reducing its secular isolation and promoting territorial cohesion. In 1988, the approval of the *Plano de Modernização e Reconversão dos Caminhos-de-Ferro* (Railways Modernization and Reconversion Plan) led to the beginning of Douro railway network closure. In 2011, the appearance of the new *Plano Estratégico dos Transportes* (Strategic Plan for Transports) turned definite a set of temporary closures, determined two years before. Nowadays, only 179 of the 578 kilometres which formed the Douro railway network remain with commercial services.

The suppressions were particularly severe in all narrowed-gauge lines. In few more than two decades, the original 387 kilometres of this sub-network were reduced to the 16 kilometres of the Tua Line between Cachão, Mirandela and Carvalhais. The aim of the present article is to identify and describe the reasons that lead to the closure of the majority of the Douro railway network. As study cases, we selected the Douro Line and its tributaries: Tâmega, Corgo, Tua and Sabor Lines. In our work, we have made a literature review to the concept of Public Policy, the importance of railways as public service as well as a presentation and description of the main strategies and plans for the Portuguese network. We used a qualitative methodology and for each case study we have made a final synthesis. At the end we presented the final considerations.

2. Literature Review

2.1 The Public Policy

Parsons (1995) stresses that before starting to discuss the public policy concept, we need to consider "what we mean by the idea of 'public'". According to the author, the 'public policy' has simply "to do with those spheres which are so designated as "public". Thus, by another words, we are assuming "there is a sphere or domain of life which is not private or purely individual, but held in common" (Parsons, 1995: 3). Therefore, it can be said Parsons highlights the "necessity of bordering the public activity field and the private activity field" (Chenrim, 2008: 5).

Furthermore, for Parsons (1995: 3), the public concept includes the "dimension of human activity which is regarded as requiring governmental or social regulation or intervention, or at least common action". This reality is applied in different sectors such as education, health, mobility and transport networks (railways and motorways). This action is taken not only so that the common good interests can be safeguarded but also so that the market imperfections can be corrected (Chenrim, 2008: 3). Nevertheless, the dichotomy between the 'public' and the 'private' is not recent.

However, the demarcation between the 'public' and the 'private' has only started to be clearer defined since the end of the 70's (Chenrim, 2008: 4-5), with the emergence of the public choice theory.

2.2 The Importance of the Railways

Dahl and Lindblom (1992: 140) sustained “the major resource is man himself” and his “claims to food, medical care or education”. Hence, the importance of the public transport seems to be forgotten in their works. In fact, Watters II (2007) has considered “economics as a discipline only slightly predates the railways”. For the author, railways are “often seen as an instrument of public policy”, not only to “combat auto congestion and pollution” but also to substitute “trucks for freight trains”.

Furthermore, as long as railways are said to play a “strong social role”, they should be seen as an important “public service”, which works as an “economic activity catalyst”. If railways are understood as an “important exogenous factor for the regional development”, they are able not only to “guarantee the sustainable mobility” but also to “stimulate activities with multiplicative power” (Pires, 2014: 30).

Judt was probably one of the authors who had better considered the importance of transports, particularly the railways, in the society organization. For Judt, the public transport “is not just as another service”. In fact, more than “carrying people from point A to point B”, the railways are “a collective project with an individual benefit” (Judt, 2010b: 199). As long as they have “generated sociability”, their appearance has allowed the emergence of the “public life” concept (Judt and Snyder, 2012: 333). In this idea, there are included not only aspects such as “public places, public access or public premises” but also the concept of “public transport” (Judt and Snyder, 2012: 333).

According to Judt, as long as railways are “eternally contemporaneous”, a country without an efficient railway network can be considered “undeveloped”. The author also refers that “railways are an essential economic activity and also an essential public service” as well as the “railways stations and their provided services to the smallest community are a symptom and a symbol of the society” (2010b). For Judt (2010a; 2010b), as long as railways are indeed a “public” and a “social” service, treating them as “a business” reveals “not understanding their nature”.

3. Policies and Strategic Railway Plans in Portugal

3.1 The *Decreto 18.190*

The necessity to have a transversal linkage that connect Tâmega, Corgo, Tua and Sabor Lines came down not only in order to cut the isolation between these railway stretches but also in order to improve commercial services by reducing transshipments and the inconvenient of passengers to take a longer route via Douro Line, if they want to change from one of the Tâmega Line to the Tua Line, as an example.

Therefore, in order to solve these problem, it was thought to create a transversal line, which could “establish the linkage” with the four narrowed-gauge railway stretches. This new itinerary would cross the center of Trás-os-Montes region in a direct link to the littoral. Furthermore, it would be possible not only to reach easily the Minho region lines but also to arrive faster to the city of Porto and to the Leixões Port. The first attempt to build this transversal stretch was done in the beginning of the 20th Century, but without success. However, the transversal line project would reborn almost three decades later, in 1930, with the *Decreto 18.190*. At that time, it was understood this railway stretch should not be postponed (Sousa, 1934; 1936).

The 1930’s Portuguese government document, the *Decreto 18.190*, established the construction of several lines in both Trás-os-Montes and Douro regions. The Basto Line

would provide the linkage between Guimarães, Tâmega and Corgo Lines, the Valpaços Transversal would connect both Corgo and Tua Lines and the Chacim Transversal the linkage between Tua and Sabor Lines. However, even though the *Decreto 18.190* referred the construction of several lines, none of them started to be built. Meanwhile, the ascension of a dictatorial government led to the cut of almost all railway investments (Pereira, 2009).

Therefore, as long as few lines would be built until the premature conclusion of the Portuguese railway network, concretized in 1949 with the inauguration of the Celorico de Basto - Arco de Baúlhe and of the Cabeço de Vide - Portalegre stretches, the Trás-os-Montes Transversal would never be constructed. Hence, the Portuguese railway network would know no significant alterations until the 80's.

3.2 Plano de Modernização e Reversão dos Caminhos-de-Ferro

In 1988, the portuguese government presented the *Plano de Modernização e Reversão dos Caminhos-de-Ferro 1988-94* (Railway Modernization and Reconversion Plan 1988-94). The main goal of the document was to "recover the railway public service", by ensuring "commercial dynamics", "costs rationalization" and "safety levels increase". According to the plan, the Portuguese railway network was "aged", "old-fashioned" and "degraded", a result from a "prolonged insufficiency of investments" which led to "losses in the quality service". In addition, there were 2090 kilometres which "had never suffered any type of beneficiation". Therefore, their conservation costs were considered "very high", especially in the narrowed-gauge railway stretches. In order to avoid accidents, CP had been reducing the running velocities. The plan also referred the maintenance and modernization of the railway network would be an "enormous material and human resources waste", with no "economic and social benefits".

The secondary railway network, in which were included all the four narrowed-gauge railway stretches considered in this work, would only receive 0,2% of the total funds forecasted between 1988 and 1994. Therefore, there were only expected roughly less than €1.5m to those itineraries for a seven years period. These lines, which were said to have "no national interest", should be "partially" or "totally" closed. While rail transportation should be reduced, many stations should be closed.

Hence, the conclusions of the plan appointed for the establishment of an alternative bus service in the lines which should be closed. However, these future suppressions should be "properly justified" and should not imply "losses for the population" (MOPTC, 1988).

In 1990, Portuguese operator CP - Comboios de Portugal understood it was not possible to "maintain railway stretches without market perspectives and in full degradation state" (CP, 1990). Later, in 1992, CP continued to refer that no "hesitations" could exist if it was indeed wanted to "eliminate one of the negative factors which has affected most the rail exploration: the provision of services with no economic or social interest" (CP, 1992). In conclusion, between 1979 and 1995 there were abandoned 901 of the 3644 kilometres that formed the Portuguese railway network. The narrowed-gauge railway stretches were the most affected, especially the ones that served the Douro region (Cipriano, 1995).

3.3 The Strategic Guidelines for the Rail Sector 2006

In 2006, the Portuguese government presented the *Orientações Estratégicas para o Sector Ferroviário* (Strategic Guidelines for the Rail Sector). The document appoints

several guidelines for the rail network, something that had not happened for decades in Portugal. The document refers railway infrastructure should be developed in the future to respond several challenges, such as regional affirmation, promotion of economic and social cohesion and the enrichment of the Portuguese territory.

Until 2015, the idea was to increase the network density and ridership. It was recognized the lack of coverage of the rail network especially when compared with Spain. The plan continues with the guidelines of the past concerning regional railways. Instead of reopening lines or stretches as well as the modernization of regional rail services, the document appoints to its rationalization (MOPTC, 2006).

3.4 Strategic Plan for Transports 2011-2015

A new austerity politics emerged in the Europe in the beginning of 2010. Hence, Portugal was forced to adopt a set of Stability and Growth Plans, as member of the EU and the Euro Zone. The *Portuguese Memorandum of Understanding* forecasted the “review” of the “railway network dimension”, in order to “increase” the “financial sustainability” of the sector.

The Portuguese government presented proposals in order to introduce another cut in the railway network. In 2011, the new *Plano Estratégico dos Transportes 2011-2015* (Strategic Plan for Transports) decided the closure of lines and stretches of the Portuguese rail network.

The document recognized the “heavy fixed costs structure” of the railway sector. The “financial disequilibrium” could be explained by a “very low cost coverage tax through the operational revenues”, especially in some of the regional lines, which presented an “extremely low” demand level. The plan also supported it was possible to “compare directly” the efficiency level between railway and motorway, in Tâmega, Corgo, Tua and Figueira da Foz Lines and the population mobility could be fulfilled through an alternative bus service (Ministério da Economia e do Emprego, 2011). However, these alternative bus services would soon disappear, after CP having said it was thinking it should not continue to transport passengers in buses (Cipriano, 2011b).

3.5 FERROVIA 2020 Plan

Presented in February 2016, the *Plano de Investimentos em Infraestruturas - Ferrovia 2020* (Investments Plan in Infrastructures - Railways 2020) is the follow up of the PETI3+ plan, presented by the previous government. This document defines several investments priorities for the Portuguese rail network and is expected to receive an important support by EU funds. The investments are especially focused in the existent network and do not include the reopening of regional lines or stretches. For the Douro Line is expected not only a €14.2m investment in the electrification between Caíde and Marco de Canaveses, but also a €46.6m investment in the electrification between Marco de Canaveses and Régua (MPI, 2016).

4. Methodology

The nature of our analysis made us to use in our investigation work a qualitative data, which is not said to “study many cases”.

In fact, rather than a “statistics representation”, a “social representation” is mainly supposed (Guerra, 2006: 40). The study object is the Douro Railway network, formed by the Douro Line and the four narrowed regional lines - Tâmega, Corgo, Tua and Sabor Lines. We were able to consider five case studies, which could provide us an “intensive” and a “deep” analysis

(Guerra, 2006). The main goal of our research is to understand and analyze why the Douro railway network was almost closed with the exception of the Douro Line between Porto and Pocinho, and the Tua Line between Cachão, Mirandela and Carvalhais. However, its future remains uncertain.

The Douro railway network shared interesting characteristics and we were able to find a “sample by homogeneity”, where it is wanted to “study a homogeneous group”. Hence, our sample was composed by “multiple cases”, as it is “sociologically more frequent”. One important aspect of qualitative research appoints for the fact that qualitative information considers “the diversity is demanded”, instead of the “homogeneity” (Guerra, 2006).

4.1 Data collect

In the investigation work we used documental analysis to collect information and data, through academic works, 1930´s Portuguese government document - the *Decreto 18.190*, strategic and government plans for the Portuguese rail transportation, CP, REFER and Infraestruturas de Portugal annual reports, studies, and others publications, several historical documents and newspaper articles with special emphasize to Público Journal. According to Quivy and Campenhoudt (1998), documental analysis is considered as an important technique for data collection because allow to find abundant and trustful information. In our investigation, we also used quantitative data. We were able to evaluate the investment performed in the Douro railway network, thanks to the information given by Infraestruturas de Portugal and we also presented the ridership evolution thanks to the data provided by CP and Metro de Mirandela, even though it was impossible to collect information about ridership in the Douro Line.

5. Case Studies

5.1 Douro Line

The Douro Line is a 191,665 kilometres Iberian-gauge railway, which connected Ermesinde (Valongo municipality) to Barca d’Alva (Figueira de Castelo Rodrigo municipality). During many centuries, the Douro River had been regarded as an “important communication link” (Aroso, 2005) as long as it was the unique access way to the surrounding region. However, the paradigm would start to change with the opening of the North Line until Vila Nova de Gaia, in 1864 (Silva, 2008: 11).

The aim of the Douro Line was to introduce a “big lever to the progress of this poor region”, which was also seen as a “big wealth producer” (Pereira, 2009). The construction of the first 29,560 kilometres took three years, between 1872 and 1875 (Aroso, 2005). Since then, the Douro Line would be progressively extended, for the five next years, with no doubts about the outline. However, the arrival to Pinhão, in 1880, showed the first argument between the engineers. In fact, while some considered the Douro Line should inflect further North, once the Tua station was reached, until the frontier, through Bragança, other sustained the Douro Line should follow the Douro River, until the frontier, placed in Barca d’Alva (Beira et al., 2012). Followed this last option, this railway itinerary would arrive to the terminal station, placed in Barca d’Alva, seven years later, in 1887.

The Douro Line was considered the “trunk”, from where derived a “series of parallel itineraries, its tributaries” (Sousa, 1903). Between 1911 and 1988, four narrowed-gauge railway stretches were working in the region: the Tâmega Line, which began in Livração, the Corgo Line, which

departed from Régua, the Tua Line, which was initiated in Tua, and the Sabor Line, which was started in Pocinho. In 1968, the Douro Line showed already a heterogeneous infrastructure. Actually, as long as it was becoming closer to the frontier, the running conditions were getting worst. By that time, “ideal velocities” (Gazeta dos Caminhos-de-Ferro, 1968) were already a mirage between Tua and Barca d’Alva.

According to Aroso (2003), this railway degradation, associated with a ridership retraction, implied the suppression of the Spanish international linkage, between La Fregeneda and La Fuente de San Esteban, on 1st January 1985. After being argued this closure had brought high losses for the Douro Line, Portugal would also deactivate its international linkage, between Pocinho and Barca d’Alva less than four years later, on 18th October 1988.

A project to abbreviate this railway itinerary to Régua existed already in 1995. However, Alijó Municipality argued that there would be an “incalculable loss for the populations” if this plan was taken (Cipriano, 1995). This threat would reappear 15 years later, by the time the fourth Stability and Growth Plan was presented. Nevertheless, the Douro Line would remain opened until Pocinho to avoid a harsh damage in the tourism development in a World Heritage region (Cipriano, 2011a).

The rail plan “Ferrovia 2020” of the Portuguese government appoints for a €14.2m investment in the electrification of the Douro Line between Caíde and Marco de Canaveses and later €46.6m in the electrification of the Marco de Canaveses - Régua stretch. It is expected that both projects could be supported by EU funds (Infraestruturas de Portugal, 2016).

A study from Infraestruturas de Portugal appoints for the reopening of the Douro Line until Barca d’Alva (near Spanish border) as an alternative route to the Beira Alta Line and which would allow to approximate Leixões Port to Spain. Closed in 1988, the renovation of the Pocinho - Barca D’Alva stretch is estimated in €43m, if electrified, and in €30m, if not electrified. Nevertheless, an additional investment between €87m and €119m would be needed in order to reopen the international linkage in Spanish territory. However, these investments could have EU funds through the Interreg Program. The reopening of the international stretch would allow not only the linkage to Francisco de Sá Carneiro Airport to the Spanish high speed network in Salamanca by train, but also the promotion of World Heritage places such as Porto, Douro Wine Region, Côa Valley and Salamanca. In the study, the Tâmega Line reopening between Amarante and Livração and the Sabor Line reactivation between Pocinho and Carvalhal is also appointed (Cipriano, 2017).

5.1.1 Timetables and Investments

In 1983, there were three daily journeys between Porto - Campanhã and Barca d’Alva. A trip along these 199,504 kilometres took 5 hours and 30 minutes. Five years after, when the Pocinho - Barca d’Alva linkage was suppressed, a journey along the entire Douro Line took 5 hours and 39 minutes (Cipriano, 2009a). In 1983, there were also three daily trips between Porto - Campanhã and Pocinho. It was necessary to spend 4 hours and 23 minutes in order to travel along these 171,522 kilometres by that time. Almost two and a half decades later, there were also three daily journeys between Porto - Campanhã and Pocinho. In 2007, the trip took 3 hours and 15 minutes.

In spite of the efforts, the time journey between Porto - Campanhã and Régua has only decreased few more than 15 minutes in almost two and a half decades. These insufficient improvements, which confirm a constant postponement of the investment, led to the finish of the Intercidades service in the Douro Line on 12th March 2006 (Público, 2006). Furthermore, some journeys are penalized between 10 and 30 minutes with a transshipment in Régua (Cipriano, 2012).

The most relevant investments in the Douro Line were resumed to the first 37,570

kilometres. Actually, the duplication and the electrification of this railway itinerary were progressively done, firstly until Cête, in September 1999, and secondly until Caíde, in November 2002 (Cipriano & Coentrão, 2007). Nowadays, IP is developing a 13,954 kilometres electrification, until Marco de Canaveses. The so promised duplication, forecasted for the Caíde - Marco de Canaveses stretch, were the Douro Line still present a “high suburban pending” (Aroso, 2003: 114), will not be done.

The running conditions still become worst as long as we get closer to the frontier. Therefore, the older tracks and the worst railway ties can be found between Pinhão and Pocinho (Cipriano, 2009b). In order to avoid negative surprises, a team was moved to Régua, with the aim of executing an “integral renovation” of the railway stretch, between Régua and Pocinho. Nevertheless, that team would unexpectedly abandon the place (Aroso, 2003). Between 2006 and 2013, IP has invested few less than €66m in the Douro Line.

5.1.2 Ridership

It was not possible to collect ridership number in the Douro Line. Nevertheless, we were able to find that ridership in 2005 was 880.000 passengers and 1.070.000 passengers in 2006 (MOPTC, 2006). By that time, the number of passengers and tourists transported in the Douro Line was said to be “growing significantly” (Aroso, 2005).

Final Synthesis

It was argued the closure of the Spanish international linkage, on 1st January 1985, had brought high losses for the Douro Line (Aroso, 2003: 127). Therefore, the suppression of the Pocinho - Barca d’Alva linkage would occur less than four years later, on 18th October 1988.

Furthermore, despite having been invested several million of Euros in the first Douro Line kilometres, the time journey between Porto - Campanhã and Régua has only decreased few more than 15 minutes in almost two and a half decades. Besides these insufficient improvements, no solution which could avoid the mandatory transshipments for travelling in Tâmega, Corgo, Tua and Sabor Lines was found. Combined with disconcerted timetables, the transshipments could constitute another important disincentive to the use of the railway (Cipriano, 2012).

It must not be forgotten all the itineraries work in network. Therefore, by one hand, as long as the Douro Line has not presented the ideal running conditions, the four narrowed-gauge railway stretches could not work properly. Nevertheless, by another hand, with the closure of the distributor linkages, the collector line stopped to be fed. All in all, this “corollary” demonstrates the railways had clearly lost their importance in the Douro region (Cipriano, 2012). However, future could be bright if the electrification arrives until Régua and the international linkage with Spain is reopened. This could also revamp the rest of Douro rail network.

5.2 Tâmega Line

The Tâmega Line is 51,474 kilometres non-electrified narrow gauge railway, which connected Livração (Marco de Canaveses municipality) to Arco de Baúlhe (Cabeceiras de Basto municipality). Built in single track, the line was born as an important Douro Line ramification, which allowed the linkage of the Alto Tâmega region to the longitudinal railway line, by crossing the Baixo Tâmega (Garcias, 2008). The first stretch between Livração and Amarante opened to commercial services on 21st March 1909.

After almost 41 years, the train finally arrived to Basto Centre region only on 15th January

1949 when Tâmega Line reached Arco de Baúlhe (Aroso, 2003). The *Decreto 18.190* published in 1930, approved the Tâmega Line linkage with both Corgo and Guimarães Lines, but construction never started.

In 1978, a CP's feasibility study for the Tâmega Line characterized the regional economic structure as "predominantly agricultural" and, therefore, as long as the "population mobility" was not stimulated, there was no "high potential traffic volume". Running conditions were described as "rather unfavourable", due to the "high number of small ray curves and of high inclination slopes". Furthermore, the rail infrastructure was "bad in more than 25% of its extension". Timetables were considered "not adapted to the population necessities", which forced the search of "other transport means".

Rolling stock had "evident tiredness", as long as it presented not only a "very discomfoting" condition but also a "frequent damage". After these conclusions, CP recognized that new investments would be necessary in the short-term, not only in rolling stock but also in infrastructure. They also admitted the savings which would result from the railway closure would "not be very significant". All in all, the "unique possible way" to reduce the "line deficit" was the implementation of a "radical change in the running scheme", so that the "respective costs" could be "minimized" (CP, 1978).

In September 1984, a document signed among the Ministry of the Social Equipment and the municipalities of Amarante, Celorico de Basto, Mondim de Basto and Cabeceiras de Basto forecasted the building of a road, between Amarante and Arco de Baúlhe (Cipriano, 1995). In 1988, with the approval of the *Plano de Modernização e Reconversão dos Caminhos-de-Ferro*, the Amarante-Arco de Baúlhe link would be abandoned on 1st January 1990 and the train would be substituted by an alternative bus service (CP, 1990).

In 1995, apart from the Arco de Baúlhe station, all the others stations have already been abandoned and the alternative bus service had already been suppressed (Cipriano, 1995). Commercial services will be only maintained between Amarante and Livração. On 24th March 2009, the Portuguese government announced the Tâmega Line closure, only three days after its centenary commemorations, due to lack of safety. This measure is a consequence of a more careful monitoring started to be done in the Portuguese railway network, few months after the fourth and last Tua Line accident (Cipriano, 2009b). CP justified this suspension with an "urgent infra-structure intervention necessity" (Costa, 2010).

In order to give no reaction time to the population, mayors and opposition, the Government and REFER preferred a "surprise-effect" for the Tâmega Line closure. It should be added the Livração railway employees were also not previously advised (2009c). A €14m investment was announced one day after the Tâmega Line closure. Even though this amount was sufficient to allow an "authentic rebuilding", it was not explained if the Tâmega Line would be converted to Iberian-gauge, which would turn possible a direct connection with the Douro Line (Cipriano 2009d), an idea highlighted by Amarante municipality, which also suggested the transformation of Douro Line until Marco de Canaveses into a suburban and electrified rail service, an investment that could increase ridership (Repórter do Marão, 2006). In June 2009, a €36.9m investment for both Tâmega and Corgo Lines (also closed on 24th March 2009) was authorized. Rehabilitation and modernization works will improve quality service and would turn the line safer and reduce maintenance costs (Costa, 2010).

Works started in 2009 but in the end of the year it was stressed the Tâmega Line could not reopen before the beginning of 2011. However, a "new contention scenario" appeared in 2010, with the austerity imposed by the Stability and Growth Plans and the Tâmega Line reopening started to be compromised.

Even though the Government has "promised" its rehabilitation, REFER was said to

have been not authorized to spend €33.3m in Tâmega and Corgo Lines modernization (Cipriano, 2009e). These “rumors” would be confirmed on 17th June 2010, when REFER informed the investment would be cancelled.

In 2011, with the new government and with the approval of the new *Plano Estratégico dos Transportes*, the Tâmega Line reactivation processed was expected to be suspended. In January 2012, the line is deactivated and the alternative bus service established between Livração and Amarante in March 2009 was also suppressed (Cipriano, 2011). While in December 2014, Amarante Municipality was working in the Tâmega Line conversion in Iberian-gauge stretch between Livração and Amarante (Amarante Municipality, 2015), in April 2017 the Municipality was planning to introduce a Bus Rapid Transport (BRT) system in these 13 kilometres (Amarante Municipality, 2017).

In April 2013, after four years of inactivity, one of the two LRV2000 units, also designated as CP’s 9500 series, travelled to the Vouga Line in order to do some tests. However, a new derailment confirmed the inadequacies of this rolling stock. These light rail vehicles started commercial services in the Tâmega Line in July 2002. They came to substitute the NOHAB railcars built in the 40’s and they are a result of a refurbishment made from railcars bought to Yugoslavia in 1976 (CP, 1995). After the Tua Line accident, in 2008, some doubts about this rolling stock have appeared. Therefore, the Tâmega Line and the Corgo Line service suspension started to be considered (Cipriano, 2008). In April 2015, five LRV2000 units were sold to Peru (A Verdade, 2015).

Recently, a study developed by Infraestruturas de Portugal refers the possibility of convert the 13 kilometres between Amarante and Livração in Iberian-gauge. The necessary investment is estimated in €37.5m (Cipriano, 2017).

5.2.1 Timetables and Investments

In 1983, there were five daily journeys between Livração and Arco de Baúlhe. At that time, the end to end journey along the 51,474 kilometres took 2 hours and 5 minutes. Meanwhile, in 1983, there were six daily trips between Livração and Amarante. The train took approximately 31 minutes to travel along the 12,770 kilometres stretch. In 2007, the daily journeys number between Livração and Amarante had increased to eight. By that time, the end to end journey was 26 minutes. A €14m investment plan was appointed for the Tâmega Line modernization. However, between 2006 and 2013, IP has only invested few more than €4.1m. More than 90% of this amount was applied between 2009 and 2010. Thus, more than €3.8m were up to now wasted.

5.2.2 Ridership

62.985 passengers traveled in 1931, between Livração and Chapa, but this number was considered “exiguous”. On 1st January 1990, almost 40 kilometres of the Tâmega Line were closed to commercial services and meanwhile it was introduced an alternative bus service between Amarante and Arco de Baúlhe. However, in spite of the disappearance of the train in this stretch, the railway itinerary demand has not decrease.

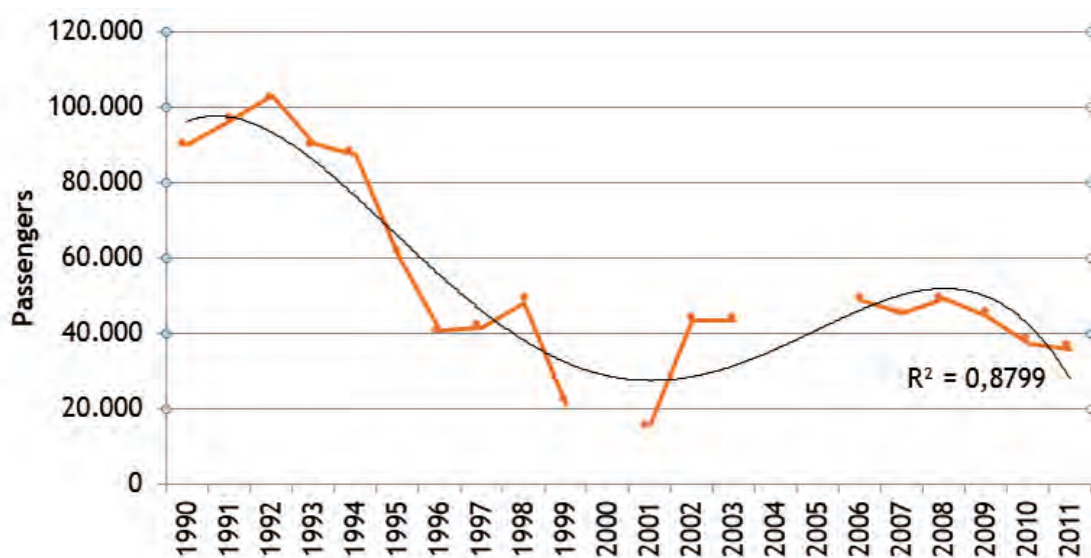


Figure 1: Ridership evolution in the Tâmega Line between 1990 and 2011. Source: CP.

According to Figure 1, in 1990, the Tâmega Line had transported 90.031 passengers and, in the following year, 96.192 passengers travelled along the railway line. Ridership still increased in 1992, with 102.937 passengers. In the two following years, Tâmega Line demand decreased slightly. However, in 1995, by the time the alternative bus service had already been suppressed, the railway started to lose an important number of passengers.

Between 1994 and 1996, Tâmega Line ridership dropped more than 50%, from 87.507 to 40.788 passengers, even though there had been a shy recovery, not only in 1997 but also in 1998.

However, the regional railway continued to lose passengers until 2001, when only 15.814 passengers were transported between Livração and Amarante. Therefore, between 1992 and 2001, Tâmega Line ridership dropped by 82%. 2002 showed signs of significant recovering with 43.646 passengers. This result will remain until 2008, when 49.250 passengers had travelled between Livração and Amarante. Thus, between 2001 and 2008, Tâmega Line ridership increased by 211%.

After rail closure in March 2009, demand continued showing good results, despite having been registered a minimal decreased. 44.850 passengers traveled between Livração and Amarante in 2009 and 37.490 passengers in the following year. In 2011, the last with alternative bus service, 35.940 passengers had still travelled in the Tâmega Line. Therefore, as long as the railway line had been transporting many more passengers between 2009 and 2011 than between 1999 and 2001, the alternative bus service suspension is incomprehensible.

To verify our analysis, the linear tendency tool can be used. In this case, when a polynomial regression of order four is applied, a R^2 almost equal to 88% can be obtained. This tool sustains the demand started to decrease in 1991, when the concavity has changed, after a very brief recovery period, between 1990 and 1991. Then, the linear tendency tool confirms that Tâmega Line ridership decrease has finished in 2001. According to this tool, after an eight years' recovery period, demand would start to fall in 2009, by the time the alternative bus service was introduced between Livração and Amarante.

5.2.3 Final Synthesis

The Tâmega Line is an unfinished project. In fact, the closest Douro region narrowed-gauge railway stretch to the littoral had never connected to both Guimarães Line and Corgo Line.

Furthermore, it was never found a solution which could avoid the obligatory transshipment in Livração between the Douro Line and the Tâmega Line.

The 1978 CP feasibility study concluded timetables were not adapted to passenger's needs and sustained infrastructure was in bad conditions. Years later, and after the accidents in the Tua Line, doubts concerning rolling stock emerged and served as motive to suspend commercial services in both Tâmega and Corgo Lines. Nowadays, the line is abandoned and the project to convert it in Iberian-gauge railway between the Douro Line and Amarante never started.

5.3 Corgo Line

With 96,167 kilometres, the Corgo Line connected Régua (Douro Region; Vila Real Municipality) to the city of Chaves. Its construction surged as a "natural idea" just "few time after" the Douro Line arrival to Régua. Train arrived at Vila Real on 12th May 1906 and Chaves on 28th August 1921 (Torres, 1958). Both linkages with Tâmega Line and Spain were considered and the expansion further south until Vila Franca das Naves was predicted. The 1930 *Decreto 18.190* continued to forecast the Corgo Line expansion further North, until the Spanish border but would be definitely abandoned years later. Further South, the decree continued to expect the expansion not only until Vila Franca das Naves but also until Pinhel. The Régua - Lamego narrowed stretch started to be constructed in the beginning of the 30's (Sousa, 1934) but years later the project would be abandoned.

In March 1968, a CP feasibility study for the Corgo Line characterized it as "essentially regional". As long as its activity was described as "high", many of the trains "should serve the maximum number of stations and of stopping places". Nevertheless, many were the concerns related with the Corgo Line profitability.

In fact, the creation of semi-direct trains, in order to serve quickly the five main stations, was suggested. According to the study, this measure could change "visibly" the profitability of the passengers traffic. Furthermore, the "compression" of employees was also mentioned.

However, in order to fulfill this second measure, it would be necessary to "close stations", which could "eventually thwart" the Corgo Line regional function. Finally, an "adequate timetable study" was also advised. Despite having suggested this set of measures, CP sustained the Corgo Line deficit was "certain and inevitable". Actually, it was stressed, by one hand, the modifications in the "commercial running" or in the "industrial running" would not be "viable", as long as the necessary investments were "considerable". By another hand, the current conditions "would never allow to satisfy" the regional transport necessities. Having these considerations in mind, CP argued to have "no interest" in prosecuting with the Corgo Line running "in the current conditions". Hence, the "most advantageous solution" was to "close the line". Meanwhile, it should be established an alternative bus service, which would not "practically affect the public" (CP, 1968).

With the appearance of the *Plano de Modernização e Reversão dos Caminhos-de-Ferro*, the Corgo Line would be closed between Vila Real and Chaves on 1st January

1990. However, the main passenger share was precisely placed between these stations. It should be stressed the Chaves Municipality had not participated in the negotiations which led to the partial suppression of the line (Cipriano, 1995). Meanwhile, an alternative bus service, between Vila Real and Chaves, was initiated (CP, 1990). In 1995, the service was suspended. As in the other cases, the main winners were the bus companies.

Years later, on 24th March 2009, CP suspended commercial services due to an “urgent infra-structure intervention necessity” (Costa, 2010). One day after the Corgo Line closure, a €26m investment was announced and in March 2009, it was stated the works would start in four months (Cipriano, 2009d). By the end of the year, important works were already made but Corgo Line could not reopen before the beginning of 2011, as long as the narrowed-gauge railway ties were being difficult to find (Cipriano, 2009f).

Since the middle of the 90´s, Corgo Line was being served by LRV 2000 railcars CP 9500 series, in order to modernize services and comfort. After the fourth and last Tua Line accident, some doubts about this rolling stock have appeared. Therefore, the Corgo Line and the Tâmega Line service suspension started to be considered (Cipriano, 2008). A “new contention scenario” appeared in 2010, with the Stability and Growth Plans. The “rumors” which pointed for the works suspension were confirmed on 17th June 2010, when REFER informed the investment would be cancelled (Costa, 2010). In 2011, with the *Plano Estratégico dos Transportes* approval, Corgo Line was definitely closed. In January 2012, the alternative bus service established between Régua and Vila Real in March 2009 was also suppressed.

Vila Real district capital is the only portuguese university city without train. Therefore, Vila Real Municipality want to reactivate the Corgo Line, between Régua and Vila Real, but a new financial support, created by the Government or by the EU, is absolutely necessary in order to concretize these desires. Until there, the Municipality is planning to transform the Régua - Vila Real stretch in a greenway.

5.3.1 Timetables and Investments

In 1983, there were four daily journeys between Régua and Chaves. At that time, the end to end journey took 3 hours and 20 minutes. Meanwhile, in 1983, there were five daily journeys between Régua and Vila Real. The train took approximately 54 minutes to travel between both cities. Therefore, while it was necessary to wait 3 hours and 26 minutes to go from Porto to Vila Real, it would be needed to spend 7 hours and 1 minute to go from Lisboa to Vila Real, by that time (MOPTC, 1988). In 2007, the number of daily journeys between Régua and Vila Real remained equal to five. By that time, the train took the same 54 minutes to link these stations.

A €26m investment was promised for the Corgo Line rebuilding. However, between 2006 and 2013, IP has only invested few less than 6,8 million of Euros in this railway itinerary. More than 85% of this amount was applied in the works which took place between 2009 and 2010. Thus, more than 5,8 million of Euros were up to now wasted.

5.3.2 Ridership

On 1st January 1990, Corgo line Lost 70 kilometres and the connection to the important city of Chaves. By that time, in order to substitute the train, an alternative bus service was established. Nevertheless, contrarily to what happened in the Tâmega Line, the introduction of the alternative bus service would not lock the Corgo Line demand reduction.

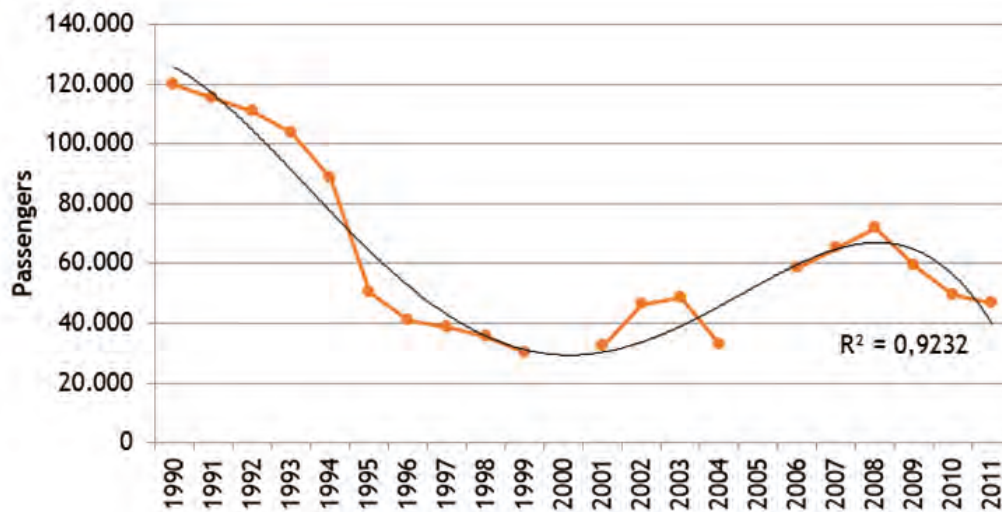


Figure 2: Ridership evolution in the Corgo Line between 1990 and 2011. Source: CP.

According to Figure 2, ridership in 1990 was 119.842 passengers. Demand would start to decrease continuously, especially since 1993. In fact, whereas 103.609 passengers were moved, in that year, only 88.300 were transported between Régua and Chaves, in 1994. In the following year, by the time the alternative bus service had already been suppressed, ridership was 50.412 passengers. This continuous demand fall would persist until 1999 with only 30.102 passengers. Therefore, between 1990 and 1999 ridership decreased by 75%.

A recovery period was registered with 46.290 passengers in 2002 but demand would drop again with 33.047 passengers, in 2004. Since then, ridership would start a sustainable recovery period, which would persist until 2008, when 71.940 passengers had travelled between Régua and Vila Real. Thus, between 2004 and 2008, ridership had increased by 118%. It should be added this recovery achieves 139% between 1999 and 2008.

The introduction of an alternative bus service in 2009 between Régua and Vila Real, as well as happened in the 90's between Vila Real and Chaves, would be followed by a demand decrease. 59.380 passengers travelled in 2009 but in the following year the number dropped to 49.270 passengers.

In 2011, the last year with the alternative bus service, ridership was 46.880 passengers. As it happened in the Tâmega Line, this line had also been transporting many more passengers between 2009 and 2011 than between 1999 and 2001 or even in 2004. Hence, the alternative bus service suspension can be said to be incomprehensible.

To verify our analysis, the linear tendency tool can be used. When a polynomial regression of order four is applied, a R^2 greater to 92% can be obtained for the Corgo Line case. This tool sustains the demand started to decrease even before 1990, when the concavity has changed. Then, the linear tendency tool confirms that Corgo Line ridership decreasing has finished in 2000. After a nine years' recovery period, ridership would start to fall again in 2009, by the time the alternative bus service was introduced. This idea is confirmed by the linear tendency tool.

5.3.3 Final Synthesis

As we were able to highlight, no solution which could avoid the mandatory transshipment in Régua between the Douro Line and the Corgo Line was found. Besides this inconvenience, the passengers were obliged to spend 3 hours and 20 minutes on board of the Corgo Line. Neither the advised “adequate timetable study” was promoted nor the recommended creation of semi-direct trains was established. In 1968, it was already acknowledged the Corgo Line conditions “would never allow to satisfy” the regional transport necessities. Later, the appearance of a *newer* rolling stock was a motive that led to the Corgo Line suppression. In fact, the “asymmetric” LRV2000 series was probably in the origin of two of the four Tua Line accidents (REFER, 2008). We can conclude that in order to avoid new incidents, it was decided to close both Corgo and Tâmega Lines, due to rolling stock inadequacy.

5.4 Tua Line

The Tua Line was the first narrowed-gauge railway stretch built in the Douro region. With 133,768 kilometres extension, the line connected Foz-Tua (Carrazada de Ansiães Municipality) to the city of Bragança. Construction works started on 1884 and the train arrived “triumphally” at Mirandela on 29th September 1887. The first branch crosses a very difficult and hardly terrain, only surpassed with the construction of several tunnels and viaducts (Cardoso & Machado, 2008). In the beginning of the 20th Century, it was understood “no other” railway itinerary was presenting “a so high development” in Portugal. Considerations such as this one were in the basis of the Tua Line extension further North and the train would arrive to Bragança, on 1st December 1906 (Gazeta dos Caminhos-de-Ferro, 1902). However, the Tua Line was never concluded. Expansion further North of Bragança until Quadramil iron mines and the Spanish village of Puebla de Sanabria was considered (Sousa, 1935). The linkage to the Dão Line via Viseu was also predicted but none of the extensions happened.

In January 1970, a CP feasibility study suggested the Tua Line suppression, as long as the “running financial results” were “rather unfavourable”. Nevertheless, it was recognized the Tua Line closure could “compromise the systematic regional valorization”. Actually, even this feasibility study acknowledged a “weak density” not only of “regional roads” but also of “regional automobiles”. Therefore, it was recommended to promote not only a “bigger rationalization of the current line exploration system”, with “no important investments”, but also a “more active commercial action”, in order to catch a “bigger traffic”.

In 1985, a protocol signed between the Minister of the Social Equipment and the mayors of the region forecasted again the Tua Line suppression. The municipalities agreed with the reduction of the number of trains, with the closure of the stations and with the introduction of the Simplified Exploration Regime (Cipriano, 1995).

The following years brought a harsh *attack* to the regional railways. After a new timetable disconcertion, the Mirandela - Macedo de Cavaleiros stretch would be closed on 15th December 1991 (Garcias, 2008), in order to fulfil the *Plano de Modernização e Reconversão dos Caminhos-de-Ferro* guidelines. Nevertheless, two days after, on 17th December 1991, a derailment in the small village of Sortes, would lead to the closure of the Macedo de Cavaleiros - Bragança stretch (Cipriano, 2008a). Meanwhile, in order to substitute the train, an alternative bus service had already been created.

However, the Mirandela - Bragança linkage in which were spent €1.5m in 1991 (Rodrigues, 2008), would be definitely closed in the daybreak of 13th to 14th October 1992 when

surprisingly, CP removed the rolling stock from Bragança station to the Mirandela depot. The alternative bus service would disappear along the second half of the 90's. At that time, a €60m investment plan was considered for the Bragança-Mirandela stretch, in order to improve and modernize commercial services. However, the idea didn't go forward (Pires, 2014).

Years later, on 28th July 1995, the creation of the regional operator *Metropolitano de Mirandela S.A.* allowed the reopening of the 4 km stretch between Mirandela and Carvalhais. This change led to the introduction of new rolling stock composed by refurbished railcars - The LRV 2000 units or CP 9500 series which would be introduced in the entire Tua Line in 2001 (CP, 1995).

Between 2007 and 2008, four accidents took place in the Tua Line. The first one, which occurred on 12th February 2007, would be caused by a stone sliding (LNEC, 2007), while the second accident, which took place on 10th April 2008, was explained by the fall of "two or three" stones. The third accident occurred on 6th June 2008, and was justified by a problem in the train, which "jumped of the tracks after a small curve, in a stretch "recently intervened" (Refer, 2008). The fourth and last accident would occur on 22nd August 2008. According to the Swiss Federal Railways (SBB CFF), factors such as the "scale", "warping", poor infrastructure conditions and maladjusted rolling stock were probably in the origin of the derailment.

In November 2008, a "set" of actions which would guarantee not only the "global recovery" but also the "safety improvement" of the Tua Line was presented by the Portuguese government. By that time, the reopening of the Tua-Cachão linkage was forecasted for March 2009 (Pinto, 2008). Nevertheless, with the approval of the Tua Dam construction in May 2009, the first 21 kilometres of the Tua Line would definitely become underwater. A Mobility Plan was presented in order to substitute the train. Investment solutions were also presented for the reconnection of the Tua Line to the Douro Line. A new stretch could cost between 40 and €300m (Pires, 2014).

However, in 2010, REFER requested to the Portuguese Government the Tua Line disqualification from the railway network, by arguing it wanted to have no more responsibilities in this railway stretch. According to REFER, it was necessary to know if the "public transport necessities" could not be satisfied "in more affordable and more efficient conditions" in the places served by the Tua Line "through the implementation or the reinforcement of other transport means". REFER moved six years backwards in order to conclude "the social and economic minimum values" were not fulfilled in order to "maintain the public railway service". In fact, on average, in the first quarter of 2004 each running has only moved nine passengers.

Nevertheless, REFER recognized no demand studies were done in order to evaluate the potential market of the Tua Line (Cipriano, 2010). The disqualification would only be approved in 2016 (Damião, 2016), by the time the Tua Dam was concluded. Nowadays, the Mobility Plan for the Tua Valley is slowly moving forward, and most of the 134 kilometres of the Tua Line are abandoned.

5.4.1 Timetables and Investments

In 1980, there were four daily journeys between Tua and Bragança. At that time, a trip along the 133,768 kilometres of the Tua Line took 4 hours and 17 minutes. Meanwhile, there were six daily trips between Tua and Mirandela. The train took approximately 1 hour and 33 minutes to travel between these 54,092 kilometres.

Therefore, it was necessary to wait 7 hours and 12 minutes from Porto and 10 hours and 53 minutes from Lisboa in order to reach Bragança by train (MOPTC, 1988). The number

of daily journeys between Tua and Mirandela would drop from five to three in 2001. Six years after, in 2007, when three daily trips were still done between these stations, the train took 1 hour and 34 minutes in order to link Tua to Mirandela. With the introduction of a new velocity limit, after the 12th February 2007 accident, the time journey would increase to 1 hour and 50 minutes. Meanwhile, the number of daily trips between Tua and Mirandela would also drop from three to two (Cipriano, 2008a). Between 2000 and 2005, REFER has invested few less than €2m in the Tua Line. The interventions executed after the 25th April 2000 incident have consumed almost 50% of this amount. Only few more than €3.5m were invested in the Tua Line between 2006 and 2013. Even with the four accidents, this amount is smaller than the one which was applied not only in the Tâmega Line but also in the Corgo Line.

5.4.2 Ridership

In 1992, the Tua Line lost almost 80 km with the closure of the stretch between Bragança, Macedo de Cavaleiros and Mirandela, which are the main villages of Trás-os-Montes Region and the ones that have more population. This measure had huge and negative consequences in Tua Line ridership.

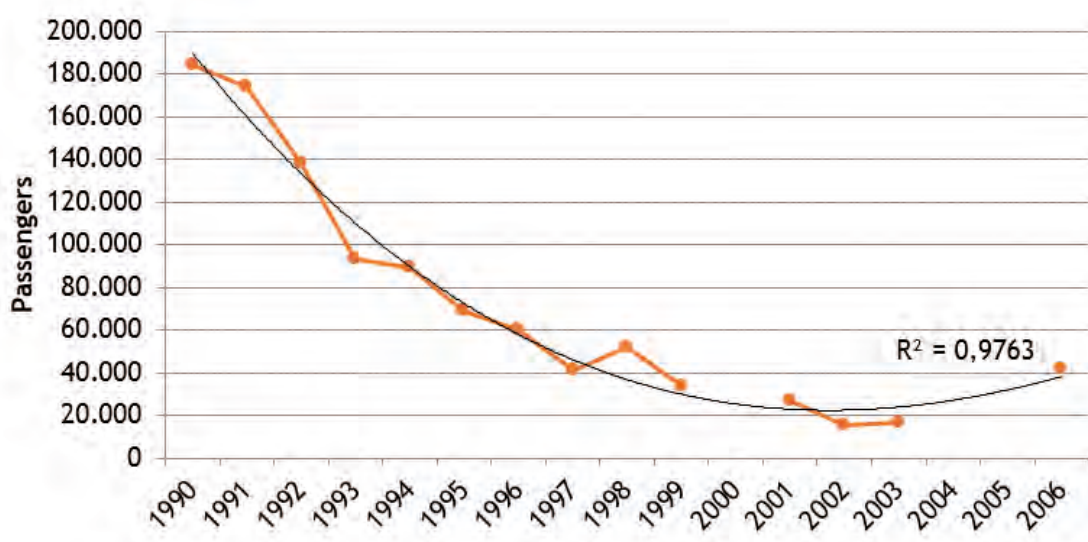


Figure 3: Ridership evolution in the Tua Line between 1990 and 2006. Source: CP.

According to Figure 3, in 1990, Tua Line demand was 184.388 passengers. Since then and after being suppressed both Mirandela - Macedo de Cavaleiros and Macedo de Cavaleiros - Bragança linkages, ridership would continuously decrease until 1997. Between 1990 and 2002, demand has decreased by 92%. However, ridership would start to increase in 2002. At that time LRV 2000 railcars started commercial services, which led to the suppression of two daily journeys between Tua and Mirandela. As long as 41.905 passengers travelled in 2006, the demand had increased by 178% in only four years.

Our analysis can be verified with the linear tendency tool. Actually, when a polynomial regression of order two is applied, a R^2 greater to 97% can be obtained. Furthermore, this tool confirms the tendency in the Tua Line demand decrease has finished in 2002, when the concavity has changed.

The high number of constraints occurred in the Tua Line since 2007 forced us to stop

our linear tendency analysis in 2006. Nevertheless, we were able to collect data after this year. In 2007, the railway stretch demand decreased by almost 50% when compared to 2006 with only 21.466 passengers. It should be expected a new huge fall in the demand with the seriousness of the 12th February 2007 accident. However, surprisingly, the passengers and the tourists continued to travel along the Tua Line. Hence, in 2008, when three more accidents took place, 36.440 passengers travelled in the line. The Mirandela - Carvalhais urban linkage was not considered in this analysis. Nevertheless, we were able to collect data for this stretch thanks to the support of Metro de Mirandela. Thus, while 66.285 passengers travelled in 2013 between Mirandela and Carvalhais, in 2014 ridership was 110.717 passengers. This 67% increase confirms that the Tua Line continues to be an indispensable transport mean for the local population.

5.4.3 Final Synthesis

It was never found a solution which could avoid the obligatory transshipment in Tua between the Douro Line and the Tua Line. In addition, the timetables were progressively disconcerted and journeys were suppressed.

Actually, the number of daily journeys between Tua and Mirandela has dropped from six to two, in roughly two and a half decades. Thanks to the persistent reduction of the running velocities, it was necessary to spend 1 hour and 50 minutes in order to cover the 54,092 kilometres between Tua and Mirandela. Besides all these inadequacies, the connection between the Douro Line and the Tua Line was said to be “not articulated” (Simão, 2009: 64). Thus, the utilization of the train until Porto, through the Douro Line, became progressively even less interesting and competitive.

The Tua Line achieved an extremely low maintenance level. In the 80's, the Mirandela - Bragança linkage still presented the original railway tracks (Pires, 2014). In addition, the installation of a stone sliding detection system and the implementation of reception and dissipation energy boxes, which could probably have avoided two of the four Tua Line accidents, were never promoted. The persistent disinvestment has also affected the rolling stock. Actually, the “lightness” of the LRV 2000 railcars was probably in the origin of two of the four Tua Line accidents. Therefore, we can conclude the inadequacies of this rolling stock were in the basis of both Tâmega and Corgo Line suppressions.

5.5 Sabor Line

Sabor Line was the remotest Douro region narrowed-gauge railway stretch (Torres, 1958). With 105,291 kilometres, the line connected Pocinho (Foz Côa Municipality) to Miranda / Duas Igrejas (Miranda do Douro Municipality). Its construction started in 1903 but the first 33,473 kilometres, between Pocinho and Carviçais, only opened to commercial services on 17th September 1911. The train arrived at Miranda/Duas Igrejas on 22nd May 1938 (Cardoso & Machado, 2008). Sabor Line is known for the 540 metres gap along 25 kilometres of continuous rise, before reaching Felgar, which is the longest railway ramp in Portugal. The construction of a stretch until Vimioso, crossing the important agricultural zone of Vilariça Valley and international linkage with the Spanish city of Zamora were considered.

With the *Decreto 18.190*, published in 1930, the linkage with Spain would be definitely abandoned. Nevertheless, the arrival to Vimioso was approved and continued to be expected. In addition, the document sustained the expansion further South until the Beira Baixa region. In spite of its importance, Sabor Line extensions never happened.

In October 1971, CP concluded a feasibility study for the Sabor Line. The conclusions

appoint that the line was the most peripheral railway stretch, which only served three villages with “some local dimension”: Torre de Moncorvo, Mogadouro and Miranda do Douro, but only Torre de Moncorvo had a station in its urban core so that an “outline correction” was recommended. The study also referred the great majority of the population worked in agriculture, an aspect that affected negatively the “demand structure” and the journeys had frequently an “occasional character”. In addition, an “appreciable part” of them was still done in “animal traction vehicles”, in a region where the roads were “scarce” and where the “depopulation process” did not “contribute for the existence of a significant demand”. Thus, it could be concluded the “undoubted stagnation” and the “difficult diversification” of the local economic activities constituted a barrier to the appearance of “new traffics”. The study also referred the “low intensity” of ridership was due to the “bad quality service”, predominance of primary activities, low regional per capita income and tendency for the depopulation.

Other factors explained the Sabor Line decline. Bad infrastructure conditions and rolling stock allowed the “local bus companies” to have a “better concurrence position” than the train. In addition, the Sabor Line “rather high” production costs could only be “substantially reduced with high investments”, whose “reimbursement would practically be impossible”.

Despite being acknowledged an investment “necessity”, especially in rolling stock and infrastructure renewal, it was understood this spending would bring “additional amortization and interest charges rather accentuated”. Furthermore, it was pointed the “current and foreseeable regional development level” would not justify the “duplication of the existing services”.

Therefore, as long as the “running financial results” were “rather unfavorable”, the Sabor Line closure was advised. In this particular case, it was understood the railway suppression would not “compromise the systematic regional valorization”. In fact, it was pointed the Sabor region was “sufficiently provided of roads”, which presented also “better outlines” than the railway. If the Sabor Line remained working, a “systematic transport degradation”, which would lead not only to a “progressive traffic reduction” but also to the “exploration deficit aggravation”, should be expected. In addition, it was pointed “it would be difficult to introduce some rationalization measures in the current running system”. Therefore, the appearance of an alternative bus service would allow to provide a “more adequate” and a “less expensive” service than the one ensured by the train.

This feasibility study, probably the most severe of all the four which were produced by CP, showed the Sabor Line was especially threatened. Actually, the first closure fear would appear in September 1979. Nevertheless, by that time, the popular reaction would be so “violent” that there would be used “beanpoles” and “agricultural implements” (Garcias, 2008). Despite having been able to save “their train”, the inhabitants would not be able to avoid the Sabor Line state “of agony”.

In 1980, there was only one daily running between Pocinho and Miranda / Duas Igrejas. Furthermore, by that time, it was already established an alternative bus service along the entire Sabor Line, which took less 24 minutes than the train. Passengers service closure would be concretized in March 1984, when Torre de Moncorvo, Mirandela, Bragança and Vimioso municipalities agreed to close Sabor Line. As counterparty, the document signed among them expected to pave some roads and to build a bridge over the Angueira River (Cipriano, 1995).

Concerning freight trains, they would remain even after 1984. However, with the approval of the *Plano de Modernização e Reconversão dos Caminhos-de-Ferro*, the

Sabor Line would close definitely on 1st August 1988. Years after, the silos and the mines would also be deactivated.

At the same time, it was created a new regional bus company, which provided the linkage between Freixo de Espada à Cinta and its railway station, placed 16 kilometres further away from the village center. Nowadays Sabor Line is mostly abandoned and part of the line is converted in a greenway. A new study developed by Infraestruturas de Portugal appoints for the revival of the Pocinho-Carvalhal link which would allow the ore transportation from Moncorvo mines directly to the Douro Line. The 23km renovation is estimated in €30m (Cipriano, 2017).

5.5.1 Timetables and Investments

In 1980, there was only one daily journey between Pocinho and Miranda / Duas Igrejas. By that time, the end to end journey along the 105,291 kilometres took 3 hours and 24 minutes. Meanwhile, there were two daily journeys between Pocinho and Mogadouro. The journey took approximately 2 hours and 30 minutes between these two stations. Concerning investments, as long as the Sabor Line was definitely closed in 1988, no investments were done since then.

5.5.2 Ridership

In 1984, when commercial services closed in Sabor Line, an alternative bus service was already being established. Therefore, the demand modesty levels should not surprise us.

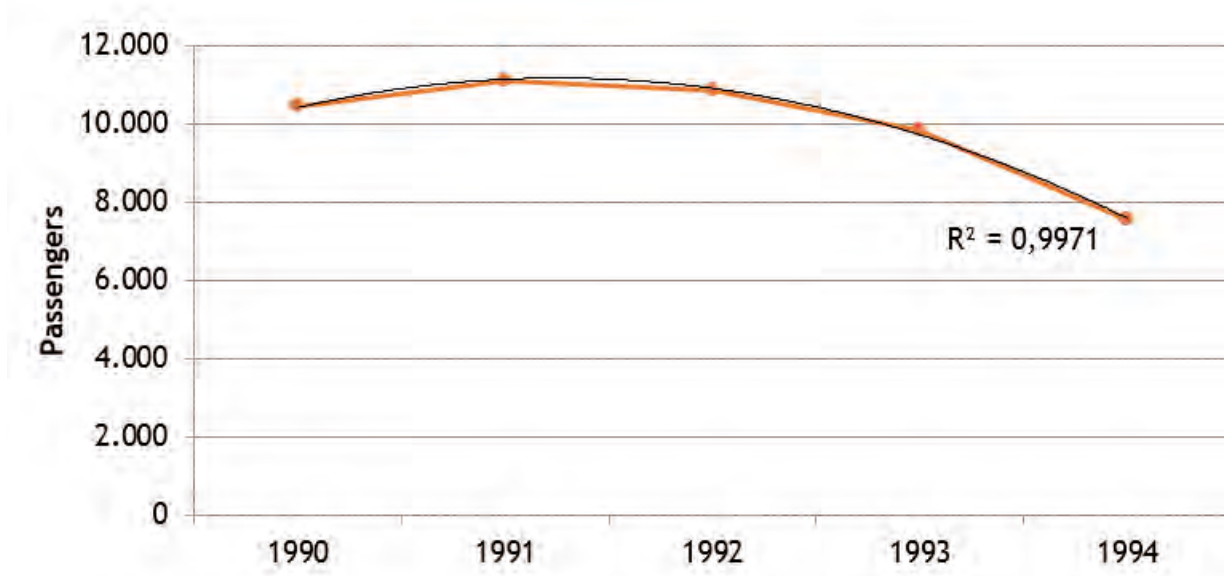


Figure 4: Ridership evolution in Sabor Line between 1990 and 1994. Source: CP.

According to Figure 1, between 1990 and 1992, few more than 10.000 passengers had travelled between Pocinho and Miranda / Duas Igrejas. The demand decrease, initiated between 1991 and 1992, would get even worse in the two following years. In fact, while 9.851 passengers would be transported, in 1993, only 7.549 passengers would travel in the Sabor Line, in the following year. Few later, the alternative bus service was suppressed.

To verify our analysis, the linear tendency tool can be used. In the Sabor Line case, the application of a polynomial regression of order two is enough to obtain a R^2 greater to 99%. This tool sustains, with no surprise, the demand started to decrease in 1991, when the concavity has changed.

5.5.3 Final Synthesis

The Sabor Line is an unfinished rail project. Actually, rather than arriving to Vimioso, the remotest Douro region narrowed-gauge railway itinerary ended in Miranda / Duas Igrejas, 11 kilometres further away from the urban core of Miranda do Douro. In addition, no solution which could avoid the mandatory transshipment in Pocinho between the Douro Line and the Sabor Line was found.

Other severe inadequacies were presented by the remotest Douro region narrowed-gauge railway stretch. In fact, the Sabor Line expansion further Northeast, along the final kilometres, was said to be “apparently subordinated” to the “easiest” way (Cardoso & Machado, 2008). However, among the municipalities served by the Sabor Line, only Torre de Moncorvo had a station in the urban core. Finally, both infrastructure and rolling stock conditions were less competitive than the local bus companies. Actually, even the alternative bus service, already established in 1980, was 24 minutes faster than the train. As long as the recommended “outline correction” was never promoted, the Sabor Line harsh weaknesses could not be surpassed.

6. Final Considerations

The “low” traffic of the Tâmega, Corgo, Tua and Sabor Lines was already acknowledged by the time of their project but this characteristic was not considered an impediment for their construction. However, throughout almost an entire century, they were remitted to an unquestionable high disinvestment level. In fact, the lack of planning and political will seems to be evident in Portugal, where railways are considered a spent, not an investment.

It is often argued that low demand levels explain railway closures, especially in rural areas. However, as we were able to stress and conclude, ridership started to decrease after the introduction of modifications in railway commercial services. In fact, the main passenger share was precisely placed between the linkages suppressed in the beginning of the 90's, at least in both Corgo and Tua Lines. The appearance of an alternative bus service has also contributed for ridership reduction. The conjugation of these two factors led to a demand decline never inferior than 75% along the 90's .

Nevertheless, it must not be forgotten the Tâmega, Corgo and Tua Lines were registering a sustainable recovery period of their demand since the beginning of the 00's. Actually, in a scarce number of years, ridership has more than doubled in all these three narrowed-gauge railway itineraries, even with no demand studies in order to evaluate their potential market.

We can also conclude that other factors rather than low demand levels can explain the Douro railway network closure. We are able to stress that the incompleteness of the **Portuguese railway network had influence**. Despite having been launched an ambitious railway project in 1930, which would allow the conclusion of the Portuguese railway network, the ascension of a dictatorial government would lead to the cut of almost all of the railway investments. Hence, the conclusion of the Portuguese railway network would prematurely occur in 1949.

Other fact is the **isolation of the distributor stretches from the collector itinerary**.

As we were able to describe, the Tâmega, Corgo, Tua and Sabor Lines came down sensibly parallel until the Douro Line and no connection was built between these four narrowed-gauge railway stretches. The Trás-os-Montes Transversal never started to be built. Passengers were obliged to take an enormous route if they want to use a different line. This fact associated with the necessity of **transshipments** was a huge limitation to improve commercial services and allowed to demotivate people from using the train.

Another aspect was the **timetables disarrangement**. It was already acknowledged the timetables were not adapted to the population necessities in 1978. Despite having been advised an adequate timetable study, it was progressively promoted not only the disconcertion but also the cut of timetables and journeys.

The reduction of running velocities was another important fact, which is connected to the lack of investment and modernization. The **extremely low maintenance level** and infrastructure abandonment got evident especially since the end of the 60's. Hence, so that the accidents could be avoided, running velocities have been progressively reduced. In the Tua Line, where the velocity could not surpass the 20 kilometres per hour in some stretches, trains needed to change their velocity more than 45 times in the 80's. By that period, in order to reach Bragança by train, it was necessary to wait 7 hours and 12 minutes from Porto and 10 hours and 53 minutes from Lisboa.

Rolling stock inadequacy was another aspect to be considered. As we were able to discuss, the Tâmega, Corgo and Tua Lines rolling stock, formed by LRV 2000 railcars since the beginning of the 00's, was a result of the refurbishment of the CP's 9700 series. Doubts about this rolling stock would appear after the fourth Tua Line accident. Subsequently, a more careful monitoring would be one of the motives that lead to both Tâmega and Corgo Lines suppression.

We can conclude the suppression of the railway itineraries cannot be justified by their low demand levels but by the scarce investment. Actually, by one hand, the secondary railway network has only received 0,2% of the total funds forecasted between 1988 and 1994.

By another hand, the investments were frequently only done in emergence situations. In fact, the repair costs of the 25th April 2000 incident have consumed almost 50% of the investment performed between 2000 and 2005 in the Tua Line.

Furthermore, the Portuguese government has only promoted a requalification of both Tâmega and Corgo Lines after having received a report which announced as "worrying" their condition. Nevertheless, as long as these works were never concluded, €9.6m were up to now wasted in these two railway lines. According to all of these aspects and the state of art of the Portuguese regional railways, we consider the national railway network suffered from lack of well-management in the last 25 years.

Our investigation work presented some limitations. Actually, as long as the contacting process with the entities responsible for the Portuguese railways has been very tardy,

obtaining the necessary data and information for the realization of this study has been extremely difficult. We wished we were able to present not only the ridership in the Douro Line but also the investment performed per year in the other case studies.

7. Bibliography

- A Verdade (2015, abril 17). Linha do Tâmega: CP confirma venda de automotoras a empresa do Peru.
- Aroso, A. (2005, agosto). A Importância da Interoperabilidade dos Transportes Ferroviário e Fluvial na Estratégia de Desenvolvimento do Turismo do Vale do Douro. *Transportes em Revista*, 30.
Recuperado de <http://www.ocomboio.net/PDF/tr-douro-01.pdf>
- Aroso, A. 2003. Bases para a Tarifação da Infra-Estrutura Ferroviária Portuguesa. (Tese de Mestrado), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
Recuperado de <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11973/2/Texto%20integral.pdf>
- Beira, E., Lourenço, P., Martins, L., Vasconcelos, G. (2012). The Engineering Design of the Tua Rail Track: Evidence from the Archives.
Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/26482>
- CP. (1995, agosto 20). Boletim Informativo: 4-5.
- CP. (1990). Relatório e Contas.
- CP. 1992. Relatório e Contas
- CP. (1978). Estudo de Rentabilidade da Linha do Tâmega.
- CP. (1971). Estudo de Rentabilidade da Linha do Sabor.
- CP. (1970). Estudo de Rentabilidade de Linhas Secundárias: Linha do Tua.
- CP. (1968). Vantagens e Inconvenientes do Encerramento de Linhas Secundárias: Linha do Corgo.
- Chenrim, P. (2008). As Políticas Públicas no Sector dos Transportes Ferroviários Portugueses Desde 1974. (Tese de Mestrado). Escola de Economia e Gestão da Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Cipriano, C. (2017, fevereiro 6). Estudo defende linha do Douro como alternativa à Beira Alta para ligação a Espanha. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/2017/02/06/local/noticia/estudo-defende-linha-do-douro-como-alternativa-a-beira-alta-para-ligacao-a-espanha-1760722>
- Cipriano, C. (2012, março 19). REFER prepara-se para retirar o seu pessoal de estações na linha do Douro. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/local-porto/jornal/refer-preparase-para-retirar-o-seu-pessoal-de-estacoes-na-linha-do-douro-24210634>
- Cipriano, C. (2011b, setembro 12). CP quer abandonar serviços rodoviários alternativos nas linhas encerradas. Público.

- Recuperado de: <https://www.publico.pt/local-porto/jornal/cp-quer-abandonar-servicos-rodoviarios-alternativos-nas-linhas-encerradas-22934228>
- Cipriano, C. (2011a, junho 26). Estudo entregue à troika propõe fecho de 800 km de linha férrea. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/2011/06/26/local/noticia/estudo-entregue-a-troika-propoe-fecho-de-800-km-de-linha-ferrea-1500246>
- Cipriano, C. (2010, outubro 16). REFER pede ao Governo desclassificação da linha do Tua por insuficiência de tráfego. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/economia/jornal/refer-pede-ao-governo-desclassificacao-da-linha-do-tua-por-insuficiencia-de-trafego-20417516>
- Cipriano, C. (2009f, junho 25). Linhas do Tâmega e do Corgo só voltam a ter comboios em 2011. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/local-porto/jornal/linhas-do-tamega-e-do-corgo-so-voltam-a-ter-comboios-em-2011-311367>
- Cipriano, C. (2009e, outubro 19). Obras vão deixar 232 quilómetros de via-férrea sem qualquer comboio. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/2009/10/19/economia/noticia/obras-vaodeixar-232-quilometros-de-viaferrea-sem-qualquer-comboio-1405717>
- Cipriano, C. (2009d, março 26). Governo garante 40 milhões para Linhas do Corgo e do Tâmega. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/portugal/jornal/governo-garante-40-milhoes-para-linhas-do-corgo-e-do-tamega-300482>
- Cipriano, C. (2009c, março 25). REFER encerra linhas do Corgo e do Tâmega sem aviso prévio aos utentes do serviço. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/economia/jornal/refer-encerra-linhas-do-corgo-e-do-tamega-sem-aviso-previo-aos-utentes-do-servico-300301>
- Cipriano, C. 2009b, janeiro 12). REFER inspecciona vias para evitar surpresas como a do Tua. Público.
Recuperado de <http://www.publico.pt/local-porto/jornal/refer-inspecciona-vias-para-evitar-surpresas---como-a-do-tua-291144>
- Cipriano, C. 2009a, agosto 28). Governo promete linha de luxo no Pocinho. Público.
- Cipriano, C. (2008b, outubro 23). Defeito de via e falta de adequação do material circulante na origem do acidente de Agosto na Linha do Tua. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/portugal/jornal/defeito-de-via-e-falta-de-adequacao-do-material-circulante-na-origem-do-acidente-de-agosto-na-linha-do-tua-280969>
- Cipriano, C. (2008a, janeiro 28). Linha férrea reabre hoje com menos um comboio por dia. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/local-porto/jornal/linha-ferrea--reabre-hoje--com-menos-um--comboio-por-dia-246815>

- Cipriano, C., & Coentrão, A. (2007, novembro 26). Grupo de 28 municípios quer o comboio em Barca de Alva. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/local-porto/jornal/grupo-de-28-municipios-quer-o-comboio-em-barca-de-alva-239064>
- Cipriano, C. (1995, julho 16). Os Caminhos do Abandono. Público.
- Costa, P. (2010, julho 28). Tâmega: era uma vez uma linha férrea? Repórter do Marão.
- Dahl, R., & Lindblom, C. 1992. Politics, Economics and Welfare. Chicago: University of Chicago Press.
- Damião, D. (2016, agosto 31). Linha do Tua desclassificada da rede ferroviária nacional. Transportes em Revista.
Recuperado de <http://www.transportesemrevista.com/Default.aspx?tabid=210&language=pt-PT&id=54832>
- Ferreira, R. (2013, maio). LRV 2000 em testes na Linha do Vouga. Portugal Ferroviário.
- Gazeta dos Caminhos-de-Ferro (1968, agosto 16). A Linha do Douro e as Ligações com a Espanha.
- Gazeta dos Caminhos-de-Ferro (1902, março 1). Caminhos-de-Ferro de Mirandela a Bragança.
- Garcias, P. (2008, setembro 15). As estradas mataram o comboio no Douro. Público.
Recuperado de <https://www.publico.pt/portugal/jornal/as-estradas-mataram-o-comboio-no-douro-276025>
- Infraestruturas de Portugal (2016). Plano de investimentos em infraestruturas Ferrovia 2020.
Recuperado de http://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/2016_02_12_plano_investimentos_ferrovia_mpi.pdf
- Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações (2006). Orientações estratégicas para o sector ferroviário.
- Judt, T., & Snyder, T. 2012. Pensar o Século XX. Lisboa: Edições 70.
- Judt, T. 2010a. O Século XX Esquecido. Lisboa: Edições 70.
- Judt, T. 2010b. Um Tratado sobre os Nossos Actuais Descontentamentos. Lisboa: Edições 70.
- Ministério do Planeamento e das Infraestruturas (2016). Plano de investimentos em infraestruturas - Ferrovia 2020.
Recuperado de <http://www.portugal.gov.pt/media/18615773/20160212-mpi-ie-investimentos-ferrovia.pdf>
- Ministério da Economia e do Emprego (2011). Plano Estratégico dos Transportes 2011-2015.
- Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações (2006). Orientações estratégicas para o sector ferroviário.

- Parsons, W. (1995). *Public Policy - An Introduction to the Theory and Practice of Public Analysis*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Pereira, G. (2009). *Os Caminhos-de-Ferro do Douro: História e Património*. Recuperado de <http://www.ocomboio.net/PDF/montpellier/portugais/gasparmartinspereira.pdf>
- Pinto, L. (2008, novembro 15). *Governo admite erro humano na Linha do Tua*. Público.
- Pires, A. 2014. *Gestão Estratégica Ferroviária e suas Implicações no Desenvolvimento Regional: El Ferrocarril de La Robla e a Linha do Tua*. (Tese de Mestrado). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10348/4527>
- Público (2006, fevereiro 26). *Comboio entre Porto e Régua ganhou 17 minutos em 30 anos*.
- Quivy, R., & Campenhoudt, I. (1998). *Manual de investigação em ciências sociais*. Lisboa: Gradiva.
- Refer (2008). *Inquérito ao Acidente Ocorrido em 22 de Agosto de 2008 ao Quilómetro 20,400 da Linha do Tua com o Comboio 6202: Relatório Final*.
- REFER. (2008). *Relatório de Ocorrência: 1 de April*.
- Rodrigues, R. (2008). *Linha do Tua ou o Fundamentalismo do Betão*.
- Repórter do Marão (2006, agosto 1). *Autarcas defendem continuidade das linhas do Tâmega, Corgo e Tua*.
- Simão, J. 2009. *Turismo como Motor de Desenvolvimento Local: O Caso do Vale do Tua*. (Tese de Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal. Recuperado de <https://run.unl.pt/handle/10362/2648>
- Sousa, J. (1935, março 1). *O Problema da Defesa Nacional*. *Gazeta dos Caminhos-de-Ferro*.
- Sousa, J. (1934, dezembro 1). *Variante Pedida na Linha do Tâmega*. *Gazeta dos Caminhos-de-Ferro*.
- Sousa, J. (1903, junho 16). *A Rede Complementar ao Norte do Mondego*. *Gazeta dos Caminhos-de-Ferro*.
- Torres, C. (1958, fevereiro 16). *A Evolução das Linhas Portuguesas e o seu Significado Ferroviário*. *Gazeta dos Caminhos-de-Ferro*.

Análisis de las oportunidades medioambientales y económicas de la electrificación de una línea ferroviaria

Analysis of the environmental and economical opportunities in railway electrification

Javier Santander Gimeno

Resumen

A día de hoy, el transporte está siguiendo un proceso de electrificación en el que, desde hace tiempo, el ferrocarril va a la cabeza. Este proceso tiene el objetivo de alcanzar un modelo de transporte más sostenible, reduciendo la huella de carbono mediante la contribución de las energías renovables, además de la emisión de contaminantes a la atmósfera, haciendo más limpio el aire que respiramos. Las instituciones han venido potenciando este cambio a través de tasas e impuestos, con mención especial a la creación, por parte de la Unión Europea, del Régimen de comercio de los derechos de emisión de gases de efecto invernadero. Dentro del análisis se incluyen cálculos necesarios para este estudio, tanto energéticos como de la huella de carbono de las circulaciones. Además, se trata la manera de poner en valor las emisiones de gases de efecto invernadero que supone la realización de esta actividad.

Palabras clave: Mix energético, emisiones, CO2, transición energética, tracción eléctrica, tracción diesel, huella de carbono, RCDE.

Abstract

Nowadays, transport is following an electrification process in which, for so long, railway leads the field. This process has the objective of achieving a more sustainable transport model, reducing the carbon footprint through the contribution of renewable energies, as well as pollutant emissions into the atmosphere, making the air we breathe cleaner. Institutions have been promoting this change through taxes and fees, with special mention to the creation, by the European Union, of the Emissions Trading System of greenhouse gases. This analysis includes necessary estimates for this study, both energetic and carbon footprint of the train movements. In addition, the way to value the greenhouse gas emissions involved in this activity is discussed.

Keywords: Energy matrix, emissions, CO2, energy transition, electric traction, diesel traction, carbon footprint, EU ETS.

Introducción

A lo largo de la historia, han predominado distintos argumentos para la electrificación de una línea ferroviaria. Desde aspectos técnicos, pasando por los políticos o sociales, hasta llegar a los medioambientales, de vital importancia a día de hoy.

Existe, sin embargo, un factor que subyace de manera atemporal a los anteriores y que es fundamental en la toma de decisiones; la rentabilidad económica. Se debe llevar a cabo la electrificación solamente si resulta positivo el estudio de rentabilidad.

Para la evaluación de las inversiones es necesario dar valor a las externalidades que generaría la electrificación de la línea, tanto positivas como negativas. Esto no suele ser sencillo ni tampoco objetivo, y por tanto, distintos estudios pueden alcanzar resultados distintos.

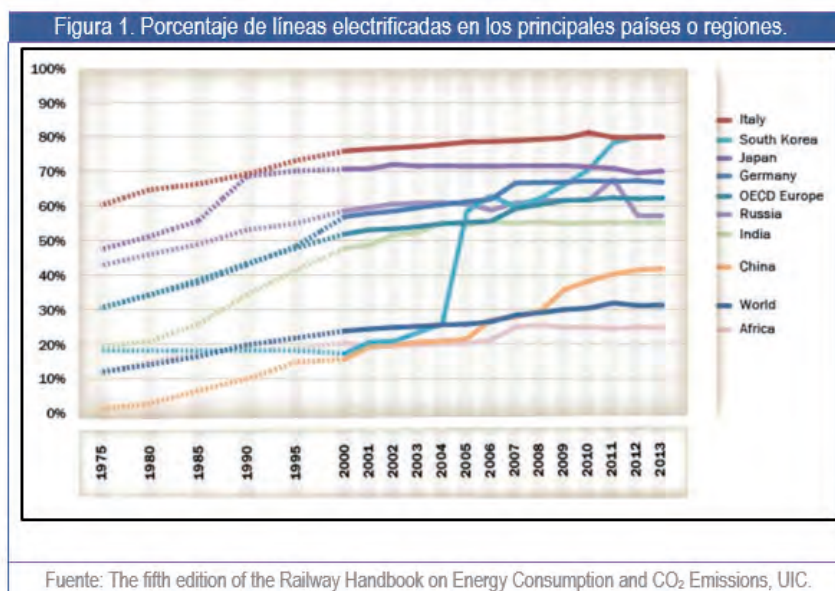
Situación en datos

En el mundo

En 2013, el sector del transporte fue el responsable de la emisión del 23,4% de las emisiones de CO₂, que supusieron 7500 millones de toneladas. De estas emisiones, el 3,5% se debieron al transporte por ferrocarril, y sin embargo, los trenes transportaron el 8% de las mercancías y pasajeros de todo el mundo.

En cuanto a las diferentes tracciones, en el año 2013, el 57,3% corresponde a la tracción diésel-eléctrica (en adelante, tracción diésel), mientras que el 36,4% a la tracción eléctrica. La tracción a vapor persiste con una cuota del 5,6%. Al comparar estas cuotas con las de 1990, se observa que mientras que la tracción diésel se mantiene igual, la tracción a vapor pierde 20 puntos que gana la tracción eléctrica.

Las líneas electrificadas han crecido un 163% entre los años 1975 y 2013 a nivel mundial, manteniendo en la mayoría de los países una tendencia creciente, como muestra el siguiente gráfico.



En 2013, el consumo específico de energía del transporte de pasajeros fue de 138 kJ/tkm, mientras que el de mercancías fue de 129 kJ/tkm. El consumo específico de energía se redujo un 63%

y un 48% respectivamente entre los años 1975 y 2013.

Las emisiones han seguido la misma línea de mejora, descendiendo un 60% y un 38% respectivamente en el mismo periodo.

En Europa

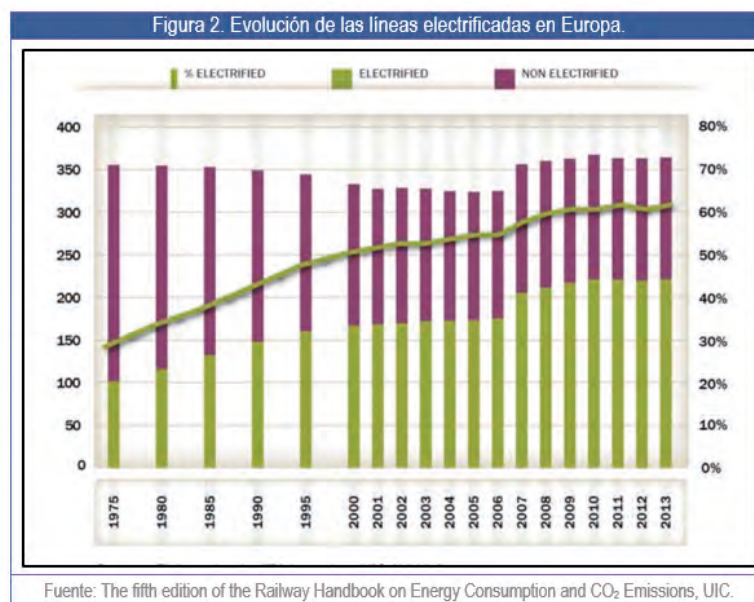
El transporte fue, en 2013, la principal fuente de emisiones de CO₂ en la Unión Europea, con una cuota que alcanzó un 31,6% del total, lo que supuso la emisión de 1100 millones de toneladas de CO₂.

De estas emisiones, solamente el 1,5% se debieron al transporte por ferrocarril, mientras que los trenes transportaron el 9,2% de las mercancías y pasajeros.

En cuanto a las diferentes tracciones, en el año 2013, la tracción diésel representó el 28,3%, mientras que la tracción a vapor, prácticamente en desuso, representó el 0,2%. A costa de ellas, la tracción eléctrica ha venido creciendo hasta situarse en el 71,1% en el año 2013.

La red de ferrocarril electrificada en Europa ha doblado su longitud entre los años 1975 y 2013, sumando 221000 kilómetros en este último año (el 61% del total de la red).

El gráfico siguiente muestra la tendencia creciente hacia la electrificación en Europa, teniendo en cuenta la longitud en miles de kilómetros y el porcentaje de las líneas electrificadas.



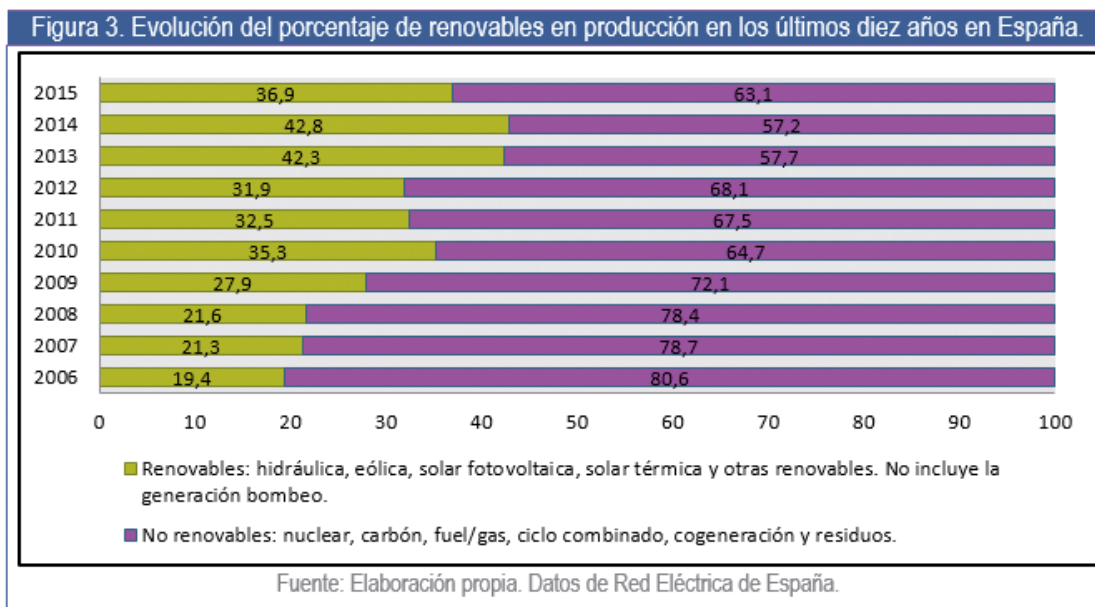
El consumo específico de energía del transporte de pasajeros cayó un 19,6%, frente al de mercancías, que cayó un 22,3% durante el periodo de 1990 a 2013.

Las emisiones han descendido, en este mismo periodo, un 41% y un 46% respectivamente para pasajeros y mercancías.

Sistema eléctrico de potencia nacional

El uso de la tracción eléctrica frente a la tracción diésel supone un avance hacia un modelo de transporte sostenible gracias al consumo parcial de energía limpia, producida mediante fuentes renovables como pueden ser el sol, el viento, el movimiento del agua, o la biomasa. El aporte de estas fuentes al sistema eléctrico conlleva la reducción de las emisiones indirectas de la tracción eléctrica y reduce la contribución al agotamiento de fuentes de energía fósil.

En el año 2016 se produjeron en España 248.383 GWh, de los cuales el 40,8% provino de fuentes renovables. Como se aprecia en el gráfico, esta cuota se ha duplicado a lo largo de los últimos diez años, y parece que seguirá creciendo debido al empuje de la Administración hacia la transición energética, objetivo prioritario del Ministerio de Energía y Turismo:



Según la Red Eléctrica de España, la producción está mantenida por tres pilares, los combustibles fósiles, la energía nuclear, y las energías renovables. Dentro de estas últimas predomina la energía eólica, con un 49%, por delante de la hidráulica, con un 31%, y la solar, con un 14%.

El avance en la tendencia creciente de las renovables hace que cada vez estemos más cerca de las cero emisiones, algo fundamental para que el ferrocarril eléctrico se posicione como el modo de transporte prioritario en los próximos años.

Fiscalidad energética

Según el informe de Eurelectric sobre la fiscalidad de la electricidad en Europa, en España los consumidores de energía, dentro de los que se encuentra el ADIF y el resto de empresas ferroviarias, pagan dos impuestos sobre el precio base de la electricidad; por un lado, un impuesto de valor añadido (IVA) que fue creado en la Ley 37/1992, y que se establece en base al precio considerado, situándose desde 2012 en un 21%. Por el otro lado, y de manera extraordinaria, se paga un impuesto especial sobre la electricidad, creado en la Ley 38/1992, y que actualmente es del 5,113%.

Esta misma Ley 38/1992 de Impuestos Especiales contiene también las tasas especiales a aplicar a los hidrocarburos, sin embargo, en el artículo 51 de exenciones, aparece en cuarto lugar la utilización como carburante en el transporte por ferrocarril, de manera que la tracción diésel queda exenta de este impuesto, que sin la nombrada exención debería pagar (331 € por cada 1000 litros de gasóleo, más el posible recargo autonómico, que en cualquiera de los casos sería igual o inferior a 48 € por cada 1000 litros).

Por tanto, se puede decir que los trenes traccionados eléctricamente soportan el impuesto especial sobre la electricidad, mientras que los de tracción diésel están exentos del equivalente impuesto de hidrocarburos.

Derechos de emisión

El anteriormente citado (impuesto especial) no es el único incentivo a la tracción diésel. En lo que respecta a los derechos de emisión de CO₂, regulados por la Ley 1/2005 del 9 de marzo, se aplican impuestos como medida fundamental para fomentar la reducción de emisiones de CO₂ en los sectores industriales y de generación eléctrica, mediante el Régimen de Comercio de los Derechos de Emisión de la Unión Europea (en inglés, European Union Emission Trading System).

En la actualidad, este régimen afecta a casi 1.100 instalaciones y un 45% de las emisiones totales nacionales de todos los gases de efecto invernadero, sin embargo, las emisiones del transporte están excluidas del mercado de derechos de emisión (a excepción de la aviación), a pesar de suponer aproximadamente un cuarto de las emisiones de gases de efecto invernadero y de ser la principal causa de contaminación del aire en las zonas pobladas.

Con arreglo al Protocolo de Kioto, la UE se comprometió a reducir un 8 % las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre los años 2008 y 2012 respecto al nivel de 1990. Durante un segundo período de compromisos comprendido entre 2013 y 2020, se comprometió a reducir un 20 % las emisiones de GEI para 2020 en relación con los niveles de 1990.

A fin de cumplir sus compromisos, la UE creó el citado RCDE de gases de efecto invernadero dentro de la UE, piedra angular de la política de la UE para combatir el cambio climático y una herramienta clave para reducir las emisiones industriales de efecto invernadero de una forma rentable.

Los titulares de instalaciones reciben o compran derechos de emisión que pueden comerciar entre ellos según necesiten. Desde 2013, la norma de asignación por defecto es la subasta de los derechos, de forma que cada derecho representa el permiso para emitir una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) o equivalentes de dióxido de carbono durante un período específico.

Además de la subasta, existe un mercado secundario de derechos de emisión, que consiste en la compraventa de estos derechos a precios de mercado a través de diversas plataformas como EEX o SENDECO₂ (en el caso de España).

Se da la paradoja de que la tracción eléctrica, por el hecho de adquirir la electricidad de la red, soporta el coste de los derechos de emisión que pagan las centrales de producción eléctrica (impuesto indirecto), sin asignación gratuita de derechos desde 2013, mientras que la tracción diésel ferroviaria, el transporte marítimo y el transporte por carretera no pagan por la enorme cantidad de CO₂ que emiten, por lo que en este caso, la aplicación del mercado europeo de derechos de emisiones no supone un incentivo para la reducción de las emisiones sino todo lo contrario.

La tabla siguiente resume la fiscalidad energética de los distintos modos de transporte:

Tabla 1. Fiscalidad según el modo de transporte.			
	I.V.A.	Impuesto especial	Derechos de emisión (EU ETS)
Ferrocarril diésel	Sí	Exento	No incluido
Ferrocarril eléctrico	Sí	Electricidad	Indirectamente
Carretera	Sí	Hidrocarburos	No incluido
Marítimo	Sí	Hidrocarburos	No incluido
Aviación	Sí	Hidrocarburos	Incluido

Fuente: Elaboración propia

Problemas sanitarios asociados

Existen una serie de afecciones que son comunes para el modo ferroviario; la contaminación acústica, el impacto visual, el efecto barrera de la infraestructura ferroviaria, etc. Los trenes diésel suponen mayores inconvenientes medioambientales que los eléctricos, sin embargo, existe otro aspecto en el que esta diferencia es todavía mayor; el sanitario.

Las partículas que emiten los escapes de motores diésel son de naturaleza y toxicidad muy diferente y están presentes compuestos reconocidos como cancerígenos. Los efectos adversos para la salud más conocidos son la irritación ocular y respiratoria, que provoca tos y dificultad al respirar. Además, hay evidencia epidemiológica de que existe un aumento del riesgo de cáncer de pulmón, por contener alguna sustancia carcinógena (PAH) y que son fácilmente inhalables.

El IARC, que forma parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS), clasificó en 2012 el escape de los motores de diésel como cancerígeno para humanos (categoría 1), basado en una evidencia suficiente de que la exposición está asociada a un aumento de riesgo de cáncer de pulmón.

Mientras que la tracción eléctrica mantiene localizados los posibles puntos de emisiones en las centrales de producción dependientes de combustibles fósiles, la tracción diésel emite continuamente a lo largo del recorrido del tren.

Los gastos sanitarios asociados a estas afecciones sanitarias deberían tenerse en cuenta desde la Administración a la hora de fomentar una tracción frente a otra, valorando el ahorro en medios sanitarios que se podría producir con tan solo una pequeña reducción de estas enfermedades.

Cálculo del consumo energético

Uno de los aspectos clave del análisis de las oportunidades de la electrificación de una línea es el cálculo del consumo energético de las circulaciones. Estos consumos darán una aproximación del coste del diésel y la electricidad, y permitirán estimar las emisiones de CO₂ equivalentes, de tal manera que se puedan incluir en la valoración económica del análisis de rentabilidad.

Para el cálculo del consumo se recomienda el uso de simuladores, aunque también se pueden obtener resultados aproximados conociendo las nociones básicas de dinámica ferroviaria.

Dinámica ferroviaria

Sobre el tren actúan diversas fuerzas longitudinales, siendo el balance de ellas el que produce la aceleración o deceleración del tren y explica su consumo de energía.

Las fuerzas producidas por el propio tren para aumentar o disminuir su velocidad son los llamados, respectivamente, esfuerzos de tracción y de frenado. Además, las resistencias al avance se oponen al esfuerzo de tracción.

El valor de la resistencia al avance en recta y en horizontal (R_{ar}) depende de características físicas del tren, y se compone de tres términos: el término independiente, que representa la resistencia mecánica al avance; el término dependiente de la velocidad, que representa la resistencia a la entrada de aire, y el término dependiente del cuadrado de la velocidad, que representa la resistencia aerodinámica.

En el caso de que el tren no circule por un tramo recto, la R_{ar} es una componente de la resistencia al avance total, a la que debe sumarse la resistencia adicional debida a la curva. En el caso de no circular en horizontal, la fuerza de la gravedad terrestre disminuye (en las pendientes) o aumenta (en las rampas) la resistencia al avance, y por tanto, será otra componente a sumar o restar a R_{ar} .

Cálculo de la huella de carbono

Como primera aproximación del cálculo de la huella de carbono de la circulación de un tramo se pueden utilizar las herramientas que proporciona la UIC para tal efecto: “EconTransIT” y “EcoPassenger”. Estas herramientas (eco-calculadores) para trenes de mercancías y pasajeros respectivamente, están disponibles en plataforma online y nos proporcionan un resultado aproximado, con amplio margen de error.

Para cuantificar las pérdidas y las emisiones, se realiza la división entre lo que ocurre en el propio vehículo (tank to wheel) y lo que ocurre antes de llegar a éste (well to tank). En el propio vehículo, se producen pérdidas debidas a los rendimientos de la unidad de los motores, transmisores y equipos embarcados, mientras que antes de llegar al vehículo, se producen pérdidas debidas a los procesos de extracción, transformación y transporte de la energía desde las fuentes primarias.

Mientras que en la tracción diésel las pérdidas en el vehículo son muy altas y las que se producen antes de llegar al vehículo son bajas, en la tracción eléctrica es al revés. La tracción diésel supone un bajo rendimiento “tank to wheel” mientras que la tracción eléctrica supone un bajo rendimiento “well to tank”.

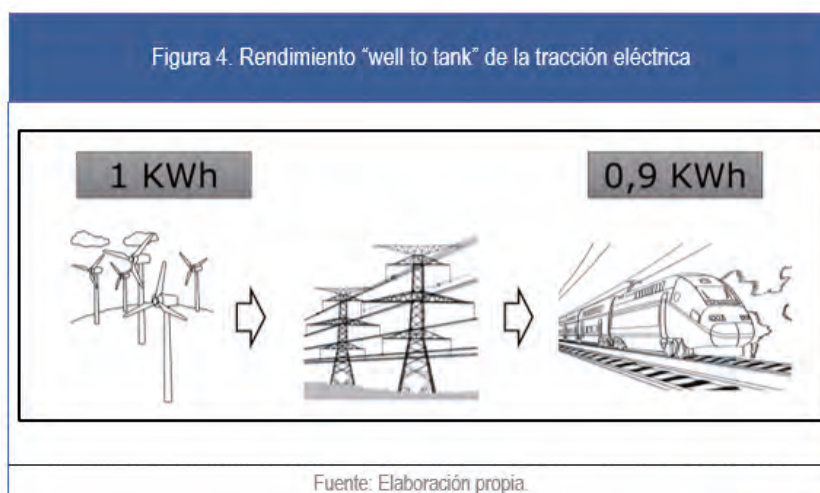
Well to tank

Para el caso de la tracción eléctrica, se toman los factores de emisiones y de pérdidas en la generación de electricidad, particularizados para el caso español, así como las pérdidas de energía en el transporte y distribución de electricidad según el nivel de tensión en que funcione el tren, del estudio EnerTrans.

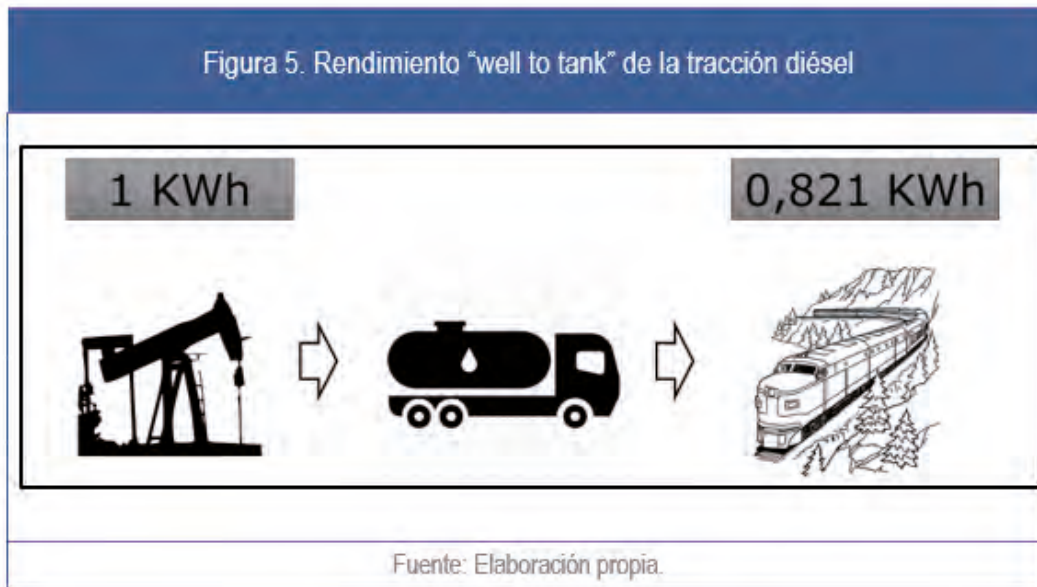
Para que llegue 1 kWh al tren deben producirse entre 1,035 y 1,292 kWh en las centrales de generación, con valor típico de 1,12 kWh/kWh.

La producción de esa energía supone unas pérdidas que dependen del mix de generación de electricidad, que varía de un país a otro e incluso de un año a otro.

En el caso de España, para el mix de generación del año 2013 eran necesarios 2,461 kWh primarios para producir 1 kWh de electricidad. En lo que refiere a las emisiones de dióxido de carbono, las que se producen en el proceso de generación de electricidad fueron en 2013 de 248 gramos por kWh generado, aunque subió hasta 302 gramos por kWh generado en 2015. A pesar de esta subida y debido al aporte de las renovables, se prevé un descenso de este factor de emisión en los próximos años.

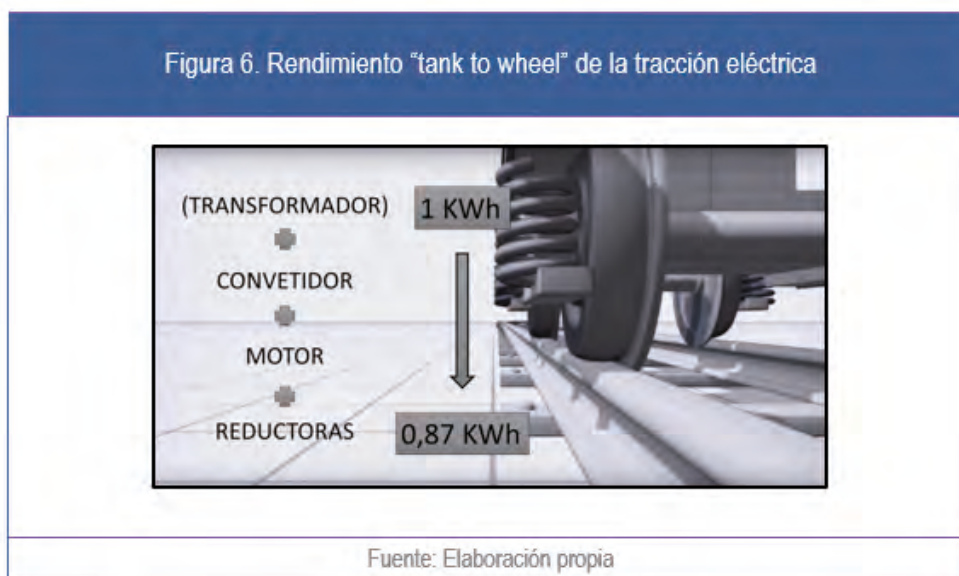


Para el caso de la tracción diésel, resulta que por cada kWh de gasóleo suministrado al vehículo (1 litro equivale, aproximadamente a 10,2 kWh) se producen unas pérdidas de 0,179 kWh desde el pozo de petróleo (la mayor parte de las cuales se producen en la transformación en la refinería) y se emiten 52,49 gramos de dióxido de carbono, lo que supondría 293,24 gramos de CO₂/kWh final.



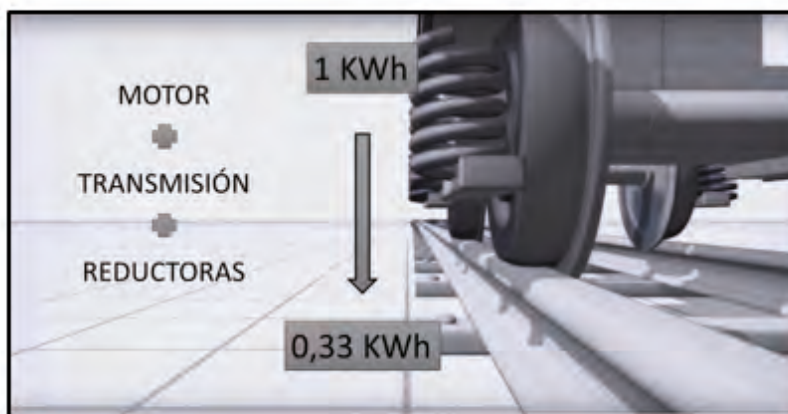
Tank to wheel

Para el caso de la tracción eléctrica, hablamos de un rendimiento representativo del 87%, a causa de los rendimientos de convertidor, motor y reductoras.



Para el caso de la tracción diésel, hablamos de un rendimiento representativo del 33%, a causa del motor, la transmisión y las reductoras. Debe también tenerse en cuenta que la combustión en el propio vehículo produce unas emisiones de 2,66 kilogramos de dióxido de carbono por litro de gasóleo suministrado al mismo, lo que equivale a 261 gCO₂/kWh (aproximadamente 10,2 kWh el litro) a la entrada del vehículo. A ello hay que sumar los valores indicados por las pérdidas "wheel to tank".

Figura 7. Rendimiento "tank to wheel" de la tracción diésel

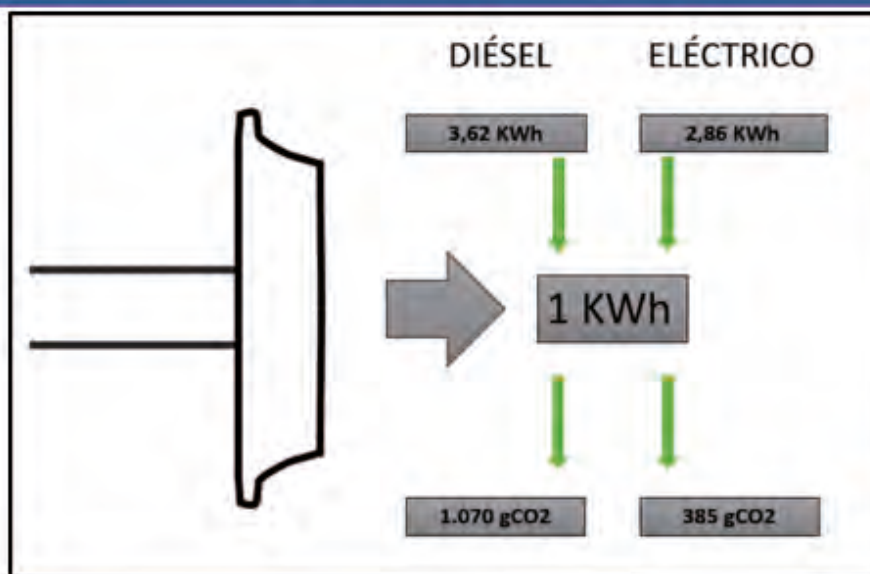


Fuente: Elaboración propia

Balance total

Mientras que la totalidad del combustible del tren diésel produce emisiones de gases de efecto invernadero, solo una parte de los combustibles que se emplean en la generación de electricidad tienen tal efecto. Como balance total, para cada kilovatio hora en llanta, son necesarios 3,62 kilovatios hora primarios en la tracción diésel y 2,86 en la eléctrica. Además, cada kilovatio hora en llanta genera 1.070 gramos de CO₂ en el caso del diésel y 385 en el eléctrico.

Figura 8. Balance total de energía primaria y emisiones por cada kilovatio hora en llanta.



Fuente: Elaboración propia

Valor de las emisiones

Es obvio que los derechos de emisión de CO₂ a la atmósfera tienen un valor, sin embargo, se diferencia el valor del mercado del valor sombra.

El valor del mercado viene definido por la oferta y la demanda en cada momento. La oferta está definida por las autoridades europeas, que marcan un ritmo de decrecimiento de las emisiones, de manera que los volúmenes emitidos estén fijados y sigan una tendencia fija decreciente (-1,74% anual). Este mecanismo de reducción de las emisiones (EU ETS) tiene inconvenientes, por ejemplo, en periodos de recesión económica, en los que la economía no crece, las empresas disminuyen la demanda y los precios caen, como ha ocurrido en los últimos años, de manera que el valor de los derechos de emisión es muy reducido y no se corresponde con el valor real.

El concepto de valor (o precio) sombra del carbono, se establece considerando que las emisiones suponen una externalidad negativa para la sociedad, debido a sus actuales y potenciales consecuencias. Esta externalidad debería ser entendida como un coste adicional en los procesos productivos y, por tanto, como una disminución de los márgenes de beneficios de bienes y servicios.

Aunque monetizar algo intangible supone siempre un reto, se han elaborado tasaciones que marcan la evolución del precio a lo largo de los años, como la que se concluye en el “Handbook on Estimation of External Cost in Transport Sector”.

En la tabla se recogen los valores a utilizar dentro del análisis de rentabilidad para incluir los costes que suponen las emisiones realmente.

Tabla 2. Precio sombra de la tonelada de CO ₂ .			
Coste de la tonelada equivalente de CO ₂ recomendado (€)			
	Coste a la baja	Coste medio	Coste al alta
2010	7	25	45
2020	17	40	70
2030	22	55	100
2040	22	70	135
2050	20	85	180

Fuente: Elaboración propia. Datos de "Handbook on Estimation of External Cost in Transport Sector".

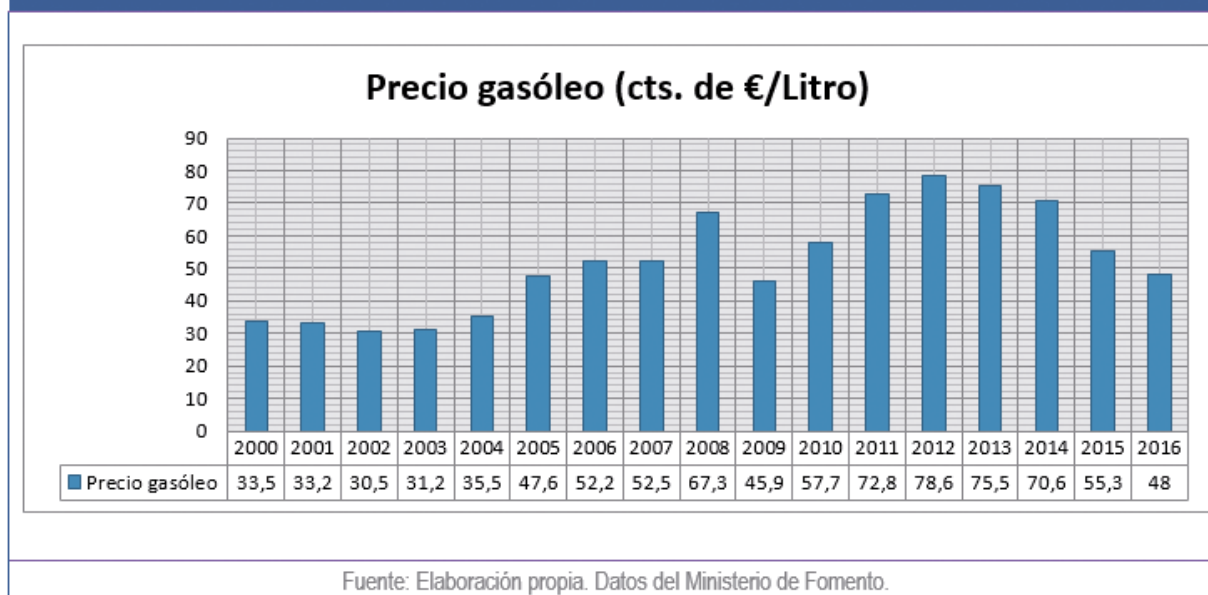
Coste de la energía

Para un tren diésel, por cada kilovatio hora necesario en llanta se requieren 0,306 litros de gasóleo a la entrada del vehículo. Para un tren eléctrico, por cada KWh necesario en llanta se requieren 1,12 KWh a la entrada de la subestación. Tomando como valor de referencia 0,1€/kWh (ADIF) como precio de la electricidad que consume el ferrocarril, y 0,55 €/L de gasóleo,

obtenemos que el precio del KWh es de 0,1683 € para el diésel y 0,1307€ para el eléctrico, es decir, la electricidad resulta un 33% más barata que el gasóleo, medidas en términos de energía. El precio del gasóleo es algo más inestable, y varía con el tiempo; para que el precio del consumo sea exactamente el mismo, el precio del gasóleo debería ser 0,366 €/L, es decir, valores anteriores a 2004.

Si analizamos una inversión desde el año 2000, el precio medio del gasóleo habría sido de 0,555 €/L, y la electricidad habría resultado un 35% más barata, considerando el precio actual del KWh. Respecto a la carretera, la comparación según las toneladas-kilómetro establece un ahorro energético del 60%, y una reducción de las emisiones del 94%. Para la comparación exhaustiva de precios es necesaria la aplicación a un tramo concreto.

Figura 9. Evolución del precio del gasóleo en los últimos años.



Valoración de otros factores para la electrificación de una línea

Evidentemente existen infinidad de factores que influyen en la decisión de electrificar una línea y que no se mencionan en el presente trabajo. Por ejemplo, se puede dar el caso de que un proyecto concreto no sea rentable, pero forme parte de una línea de actuación de la Administración compuesta por un conjunto de proyectos que sí lo sea.

Para la valoración de la electrificación de una línea es necesario tener en cuenta el entorno de esta línea; puntos de origen-destino y trayecto. Que en los límites de la línea existan focos de población supone un tránsito probable de mercancías y pasajeros, que además se puede ver influido por la existencia de poblaciones intermedias.

En cuanto al tráfico, es necesario valorar la evolución de la circulación, es decir, la tendencia que sigue el tráfico y el grado de saturación de la vía. Será conveniente electrificar tramos con las circulaciones suficientes, o cuya tendencia satisfaga en un futuro próximo las condiciones necesarias.

Será necesaria la valoración de los equipamientos tanto de los sistemas de bloqueo como de los sistemas de seguridad, que permitan una adecuada circulación, de manera que se priorizará la electrificación de las líneas dotadas de mejores equipamientos. El trazado de la línea también es importante, sobre todo en lo que se refiere a pendientes; la existencia de rampas pronunciadas hace que aumente el beneficio de electrificar una línea debido a las ventajas de las máquinas eléctricas frente a las máquinas diésel.

Uno de los principales argumentos a considerar será el de dar continuidad a trayectos no electrificados por completo, en los que aparecen tramos sin electrificar que imposibilitan la circulación de locomotoras eléctricas a lo largo de todo el trayecto.

Bibliografía

- AFNOR. (2012). EN 16258. Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of energy consumption and GHG emissions of transport services. European standard.
- Alonso, M. B. (2013). La emisión de aerosoles de partículas y gases en motores diésel.
- BOE. Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.
- BOE. Ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales.
- Conferencia: "Transición energética: Pasos hacia un nuevo modelo energético". (2016). Madrid, ETSII (UPM).
- EURELECTRIC. (2014). Taxes and Levies on Electricity in 2012.
- García Álvarez, A. (2009). Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diesel en el ferrocarril. ICAI, Madrid.
- García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. d. (2008). Cuantificación del consumo de energía eléctrica en el ferrocarril español. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid: Monografías ElecRail.
- García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. d. (s.f.). Usos de la energía en el transporte. EnerTrans.
- IEA & UIC. (2016). Railway Handbook on Energy Consumption and CO2 Emissions.
- López, J. M. (2008). Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte. Madrid: Monografías EnerTrans.
- M. Maibach, C. S. (2007). Handbook on estimation of external cost in the transport sector. Delf.
- Observatorio del transporte y la logística en España. (2014). Informe anual.
- Pilo de la Fuente, E. P. (2008). Flujos de la energía de la electricidad para el transporte. Madrid: Monografías EnerTrans.
- Red Eléctrica de España. (2016). Informe del Sistema Eléctrico Español

El GNL, un combustible alternativo para un ferrocarril aún más sostenible

LNG, an alternative fuel for an even more sustainable railway

Claudio Rodríguez

Director General de Infraestructuras de ENAGÁS

Resumen

El gas natural constituye una alternativa al gasóleo en varios modos de transporte como el transporte por carretera (autobuses, camiones y coches), así como en el transporte marítimo. Se trata de un combustible alternativo que permite reducciones muy significativas en las emisiones respecto a las propulsiones tradicionales, por lo que su implantación resulta altamente recomendable, al menos en una fase de transición hasta que otras tecnologías aún más eficientes alcancen un mayor nivel de desarrollo.

Palabras clave: gas natural licuado, combustible alternativo, emisiones, transporte.

Abstract

Natural gas is an alternative to diesel in several modes of transport like road transport (buses, trucks and cars) as well as sea transport. It is an alternative fuel which allows significant reductions in emissions when compared to conventional propulsions, something that makes its implementation highly recommended, at least in a phase of transition until other technologies even more efficient reach a higher level of development.

Keywords: liquefied natural gas, alternative fuel, emissions, transport

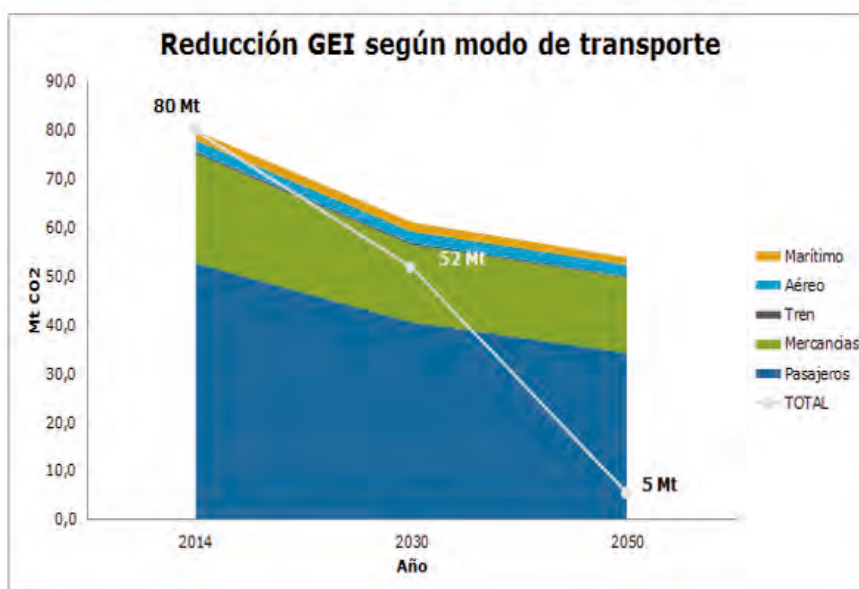
1. Antecedentes

A lo largo de una historia de más de 200 años, la tracción ferroviaria ha evolucionado aprovechando el desarrollo de nuevas tecnologías no específicamente diseñadas para ello pero que le permitieron aportar tanto una progresiva reducción de sus costes de explotación como una mejora de sus prestaciones, un aspecto este determinante en un proceso de continua competencia con otros medios de transporte, primero con el transporte por carretera y desde una época más moderna con el transporte aéreo, una competencia a la que desde los años 90´s se han añadido nuevos factores como el medioambiental ó el social, factores que de continuo han condicionado y condicionan la sostenibilidad del negocio hasta el punto de haber provocado diferentes procesos paralización de servicios y/o incluso el cierre de líneas.

El ferrocarril es hoy en día el medio de transporte terrestre más eficiente, tanto en lo que a transporte de mercancías como de viajeros se refiere presentando una intensidad energética y un nivel de emisiones (gCO₂/tKm vs gCO₂/pKm) entre 7 y 9 veces inferior al transporte por carretera y aéreo.

Una eficiencia que progresivamente ha ido mejorando (desde el año 1975 ha conseguido reducir su intensidad energética y emisiones a la mitad), en especial conforme ha incrementado el nivel de electrificación de un parque en el que la tracción dominante desde mediados del siglo XX ha sido la diesel, una electrificación que en el caso de Europa, y debido tanto al desarrollo de las nuevas líneas de alta velocidad como de los corredores de mercancías, ha permitido el desarrollo de mayores sinergias tanto directas (por el diseño integrado de trazados y vehículos) como indirectas (por el desarrollo de sistemas de regeneración y almacenamiento de energía).

A pesar de esa notable “ventaja competitiva” en mejora continua, el ferrocarril ha ido perdiendo de forma progresiva posición en el “modal share” a favor de medios de transporte menos eficientes, lo que ha impactado de forma muy negativa en la tendencia de las emisiones del sector transporte , un sector que en España a pesar de los planes de acción contemplados en el Marco de Acción Nacional de Energías Alternativas en el Transporte, aprobado en Diciembre de 2016, tiene un muy complicado horizonte habida cuenta del “gap” existente entre las tendencias de incremento de consumo y eficiencia frente a las muy exigentes limitaciones de emisiones impuestas a este sector por transposición de los acuerdos de la COP21 de París (Gráfica 1).



Gráfica 1: Tendencia de emisiones frente a compromisos sectoriales de reducción (Fuente: Enagás)

2. Una “hoja de ruta” para la descarbonización del sector ferroviario

En este contexto la UIC aprobó, en Junio de 2014, su “Hoja de Ruta”, mediante un proyecto denominado “Low Carbon Rail Challenge”, un retante, exigente (incluso en relación con lo contemplado por la “Estrategia Europea de Movilidad con bajas emisiones”) y muy acertado proyecto (habida cuenta de su perfecto alineamiento con los objetivos establecidos, algo más de un año más tarde, en la COP21 de París) cuyos principales objetivos son:

Desde el punto de vista “cualitativo”:

- Mejorar la eficiencia: reduciendo el consumo por nivel de demanda atendida (pasajeros-km; tonelada-km)
- Reducir el impacto medioambiental de la actividad: mejorando la calidad del aire en las áreas de influencia de la actividad.

Desde el punto de vista “cuantitativo”:

- Reducir las emisiones:

g/pKm o g/tKm	2030	2050
CO2	-50% (*)	-75% (*)
Consumo	-50% (*)	-60% (*)
NOx + PM	-40% (*)	-100% (*)
Noise and Vibraciones	Reduce	Reduce

(*) Respecto a 1990

- Incrementar el “modal share”:

Modal Share	2030	2050
Pasajeros	+50% (*)	+100% (*)
Mercancías	=% Carretera (*)	+50% Carretera (*)

(*) respecto a 2010

Para conseguirlo se han trazado dos ejes principales de trabajo:

- A nivel de vehículo: es la línea de la que se espera mayor impacto (hasta el 80% del objetivo global pretendido), desarrollando actuaciones:
 - Tanto a nivel de diseño (peso y aerodinámica vs modularidad y flexibilidad frente a la demanda).
 - Como muy especialmente a nivel de sistemas de tracción (binomio motorización-energía/combustible), puesto que a diferencia del apartado anterior, esta línea permite establecer acciones tanto con el abundante parque existente como con el nuevo. Esta línea pretende priorizar sobre dos líneas de actuación:
 - La electrificación
 - La mejora de la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas de tracción diésel.
 - Una hibridización progresiva que aproveche los beneficios tanto de las tecnologías

de gestión de la tracción eléctrica más eficientes, como los combustibles alternativos más competitivos.

- A nivel de gestión de la demanda: potenciación en el uso vs desarrollo de sistemas inteligentes de gestión de la demanda para maximizar los factores de utilización.

3. ¿Una “hoja de ruta” realista?

La consecución del objetivo global se presenta no solo retante, sino difícilmente alcanzable en los plazos pretendidos, por los siguientes motivos relacionados con las líneas con mayor impacto esperado en el objetivo global:

3.1 Electrificación

El ritmo de electrificación anual medio de los últimos años (de gran desarrollo en líneas de alta velocidad) ha sido del 1%, insuficiente si consideramos el nivel medio actual de electrificación mundial: 35%, por otro lado muy desigual (0-80%), incluso para el caso de la UE, donde el nivel medio es del 60% (con variaciones de entre el 30 y el 80%).

El proceso de transformación, supone un elevado coste de inversión tanto a nivel de infraestructura como a nivel de vehículos, puesto que en la mayoría de los casos es precisa la sustitución de los existentes, por lo que su aplicabilidad se limita a líneas en las que la eficiencia económica, social y energética lo justifica, generando esta medida por tanto un debate adicional de fuerte impacto social en el caso de líneas secundarias de carácter público, consideradas además de menor impacto en el “modal share”.

Un ejemplo especialmente extremo de esta situación la presenta la necesidad de disponer de locomotoras adecuadas para su empleo en los nuevos corredores ferroviarios europeos de mercancías, corredores establecidos mejorar la competitividad con la carretera, y en los que es preciso asegurar un máximo nivel de interoperabilidad (empleo de tracción adecuada a diferentes sistemas de seguridad y tensión que evite tiempos de “espera” por cambios de tracción “en frontera”), por lo que llevados al extremo, un tránsito sin cambio de tracción entre los dos puntos más distantes de la UE, conllevaría el empleo de locomotoras tritensión (y en algunos casos incluso duales para asegurar el transporte de “última milla”), cuyo coste resulta una importante barrera de entrada para facilitar los objetivos de “modal share” perseguidos. Por estos motivos, la electrificación, entre el análisis de inversiones consideradas necesarias para mejorar la competitividad del ferrocarril español (informe Deloitte 2017) supone una de las menos rentables como solución global (supone un 25% de total del Capex para conseguir una mejora del 7% del coste de transporte por FFCC).

- La resiliencia de los servicios se condiciona notablemente en el caso de una electrificación “masiva” de los mismos, frente a una flota basada en sistemas de “generación eficiente distribuida”.
- La mejora en la sostenibilidad del mix de generación no depende de la propia industria ferroviaria, sino de factores geopolíticos, estratégicos y del efecto que los mismos determinen sobre el precio resultante, el que en algunos casos vendrá marcado al alza por la necesidad de desarrollar fuertes inversiones para mejorar el nivel de participación de la generación renovable de alto coste que en cualquier caso seguirán precisando de instalaciones de back-up de gas en el medio plazo como solución fósil más sostenible:
 - A nivel global el ferrocarril consume un 60% Oil/36% Electricidad (con un mix donde el petróleo y el carbón aún presentan una cuota del 45%), luego el peso total fósil menos eficiente supone > 75%

- A nivel UE el ferrocarril consume un 30% Oil/70% electricidad (con un mix donde el petróleo y el carbón aún presentan una cuota del 30%), luego el peso total fósil menos eficiente supone > 50%

3.2 La mejora en la tracción diesel

El sector de la operación ferroviaria ha sido y sigue siendo eminentemente conservador en lo que respecta a la extensión de vida útil mediante adaptación de bajo coste de las “plataformas vehiculares”, lo que sumado al hecho de que las sucesivas normativas medioambientales no han establecido ni establecen moratorias para la adaptación y/o sustitución del parque construido con anterioridad a su entrada en vigor, ha configurado un parque de tracción con un volumen de unidades diésel que no dispone de “incentivos” para proceder al cambio y que técnicamente presentan en un porcentaje elevado configuraciones “mucho más contaminantes que las conformes a las nuevas normativas en vigor y/o esperadas a medio plazo”:

	Pre vs IIB	¿IIB vs IV?
HC	+85%	=
CO	+30%	=
NOx	+80%	+80%
PM	+95%	+40%

- **Locomotoras:** parque con tendencia a reducirse en número (en el caso de la UE a un ritmo medio de 30%) consecuencia de su mayor dedicación a unas mercancías de media y larga distancia bajo corredores internacionales o electrificados o donde progresivamente se van introduciendo locomotoras bimodales y en menor grado, por su elevado importe, locomotoras “tritensión”. Como ejemplo del “apalancamiento” del parque, en la UE, el 95% del parque con motorización previa a IIB (tan solo 25% IIIA y el resto anterior)
- **Unidades DMU:** parque con tendencia a incrementarse debido al tipo de tráfico atendido (cercanías y media distancia líneas secundarias). Como ejemplo, en la UE y para 2020, el 80% del parque se mantendrá aún con motorizaciones previas a IIB (tan solo 20% IIIA y el resto, un 60%, se mantendrá con motorizaciones anteriores, menos eficientes y mucho más contaminantes que los nuevos diseños: hasta 100 veces + PM; hasta 6 veces más NOx; hasta un 20% más de CO2)

Las perspectivas de “nueva demanda” de unidades es por tanto escasa o cuanto menos incierta, lo que limita el apoyo de una industria en lo que respecta a la inversión para el desarrollo de soluciones alternativas acostumbrada a minimizar sus riesgos y no evolucionar sin certidumbre sobre el número de unidades sobre las que repercutir los elevados costes de inversión inicial requerida.

4. Las Alternativas “Tradicionales”

Habida cuenta de esta situación algunas empresas y organizaciones ferroviarias europeas bajo el auspicio de la UIC iniciaron estudios y planes de pruebas desarrollados en el marco del EU Seventh Framework Program (2007-2013), cuyo objetivo era explorar alternativas basadas en una evolución sostenible de la tecnología diésel, proyectos de entre los que cabe destacar los siguientes:

4.1 En 2015

Se presentaron las conclusiones del proyecto “The Sustainable Freight Railway (Sustrail)”, proyecto cuyo objetivo era el diseño de un binomio vehículo-trazado para el transporte de mercancías que incrementase de forma competitiva la capacidad de transporte del ferrocarril,

un proyecto que incluía en su alcance el desarrollo conceptual de un diseño de locomotora bajo concepto de tracción híbrida que mejorase:

- La relación potencia/velocidad: para incrementar el factor de utilización de los corredores y mejorar la compatibilidad de los tráficos de mercancías con los de viajeros.
- El alto coste de la interoperabilidad: para evitar la necesidad de soluciones hasta tritensión y con tracción compatible con trazados sin electrificar.

Las conclusiones del proyecto en este apartado fueron:

- La competitividad de una solución híbrida depende de dos factores fundamentales: el diseño de la unidad conforme a un ciclo de carga lo más realista posible y un modo de conducción excelente, motivos por los que la utilización de una solución “estándar” podría no resultar una solución realmente tan competitiva como teóricamente esperable desde el punto de vista económico, lo que obviamente implica un diseño “a medida” de una ruta o rutas determinadas y esto puede suponer una seria limitación siempre que la mejora en resultados del corredor no permita una amortización total del activo.
- No existe experiencia suficiente, al margen de diseños adecuados al segmento “maniobras”, extrapolable para su implantación en el corto plazo, especialmente por dos factores:
 - Relación tamaño/coste de las baterías a instalar
 - Relación número/potencia de los motogeneradores a instalar en función del ciclo de carga a atender.

4.2 En 2014

Se presentaron las conclusiones del proyecto “Clean European Rail-Diesel (CleanER-D)”, proyecto que tenía por objetivo el desarrollo, mejora e integración de tecnologías de reducción de emisiones para vehículos diésel ferroviarios en conformidad con los requisitos establecidos por la nueva Directiva Europea 2004/26/ EC, y que incluía el desarrollo de tres pruebas piloto, una por cada uno de los tres segmentos de tracción en los que se puede clasificar por potencia y uso la motorización diésel ferroviaria, con modificación de la motorización de tres vehículos existentes por motores conformes a IIIB.

Las conclusiones de dicho proyecto fueron las siguientes:

- La combinación de la tecnología de motorización y calidad de combustible diesel actual permiten cumplir las nuevas reglamentaciones medioambientales pero precisando para ello un incremento tanto del coste (CAPEX + OPEX) como del peso derivados, muy especialmente, de la necesidad de implementar sistemas de pos-tratamiento de emisiones.
- Ante nuevos y más exigentes requisitos medioambientales, esperables en atención al decalaje histórico existente respecto al sector automovilístico, de mantenerse la tecnología diesel será necesario implementar soluciones híbridas capaces de mejorar la eficiencia del conjunto (en especial en lo que se refiere a DMU’s, donde las dinámicas de operación le suponen mayores ineficiencias por los ciclos de arranque/parada y mantenimiento de la carga para alimentar motores auxiliares durante las paradas comerciales) lo que se presenta como un fuerte condicionante, tanto por los períodos de maduración estimados para adecuar las soluciones tecnológicas existentes a este segmento (+10 años), como de cara a asegurar la transformación de unidades existentes, en especial las motorizadas actualmente con soluciones pre-III A.

Aunque su ámbito de actuación se limitaba a Europa, por amplitud de alcance y en ausencia de proyectos similares a nivel mundial, sus conclusiones son totalmente extrapolables a cualquier red ferroviaria mundial.

Por tanto, considerados los condicionantes y limitaciones que en la actualidad presentan tanto la electrificación como la evolución de la tecnología diésel, es necesario replantearse la estrategia y analizar que otras alternativas del binomio motor-combustible no solo pueden aportar alternativas a la muy condicionada “hoja de ruta de la UIC” viables a corto plazo tanto técnica como económicamente, sino además:

- Presentar suficiente margen de mejora respecto a las soluciones “tradicionales” como para:
 - Evitar limitaciones en su extensión de uso en el caso de una mayor “endurecimiento” de los requisitos medioambientales y/o económicos.
 - Asegurar un ciclo de vida de las inversiones necesarias suficiente como para permitir una amortización competitiva de las mismas.
- En su caso servir de “puente híbrido” para la introducción de otras soluciones más eficientes actualmente en proceso de maduración en el modo que minimicen el coste de una nueva transición.

5. Las “Nuevas” Alternativas

Desde el punto de vista de la rentabilidad (eficiencia obtenida/inversión realizada) de las diferentes alternativas tecnológicas actualmente disponibles para mejorar la eficiencia de un vehículo ferroviario concluye (gráfica 2) que las acciones sobre el empleo de un binomio motor-combustible más sostenible son las que a priori presentan un mayor impacto potencial.



Gráfica 2: Medidas Eficiencia con mayor impacto en el FFCC
(Fuente: 13th UIC Sustainability Conference - Vienna 2016)

Por este motivo vamos a desarrollar este apartado desde el análisis de los combustibles alternativos existentes, incorporando el análisis de las motorizaciones al apartado de la madurez tecnológica y aplicabilidad en el corto plazo, aspecto que fue previamente establecido como especial relevancia habida cuenta de los objetivos perseguidos.

En cuanto a los combustibles alternativos, el catálogo de alternativas potencialmente evaluable es amplio, sin embargo vamos a limitar el análisis comparativo en conformidad al criterio recogido por la UE en su Comunicación del 24 de Enero de 2013 titulada “Energía limpia para el Transporte: Estrategia Europea en materia de combustibles alternativos”, en la que, además del vector energético electricidad, se consideran como tales al hidrógeno, los biocarburantes, el gas natural y el gas licuado de petróleo.

Dicha “simplificación” del “catálogo de alternativas” es favorable al objetivo perseguido fundamentalmente por dos motivos:

- La UE solo considera aquellos tecnológicamente “disponibles” y utilizables a gran escala en el corto y medio plazo.
- En octubre de 2014 la propia UE publicó la “Directiva 2014/94/UE relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos”, una Directiva que actualmente se encuentra en desarrollo en cada Estado Miembro (como “Marco de Acción Nacional”) y que impulsa la disposición de suficientes puntos de suministro para cada tecnología en el horizonte 2025. Unos plazos y un horizonte muy favorable para que los avances que se ya previsto desarrollo para otros sectores de la movilidad europea aporte sinergias (técnicas, regulatorias...) que simplifiquen el acceso de dichas tecnologías al sector ferroviario en el horizonte del propio Plan de la UIC: 2030-2050.

Establecidas las bases, establezcamos a continuación unos criterios de comparación acordes con los objetivos perseguidos, y que por tanto permitan determinar cuál es la solución más competitiva en el horizonte 2030-2050 para el ferrocarril de la UE: •

- Criterios Cualitativos:
 - Seguridad del suministro: disponibilidad de recursos energéticos y flexibilidad de su cadena de suministro para atender la demanda (cantidad y calidad) esperada de forma resiliente.
 - Madurez tecnológica: viabilidad a corto plazo por disposición de experiencia con motorizaciones similares que hayan empleado el combustible aplicable a todos los segmentos ferroviarios (de DMU a Heavy Haul). No se considera, en este punto, ni el coste ni el impacto ambiental que disponen de apartados de comparación específicos.
 - Seguridad: riesgos asociados a la manipulación del combustible en el transporte, el repostaje y el uso del mismo.
 - Hibridabilidad: capacidad o, de adaptarse de forma competitiva a vehículos existentes, o de evolucionar hacia una “plataforma vehicular modular” adaptable a nuevos desarrollos tecnológicos más eficientes (soluciones renovables no maduras a la fecha) que permitan mantener el espíritu de “extensión” de vida útil habitual en la industria ferroviaria.
- Criterios Cuantitativos:
 - Precio:
 - Capex: inversión asociada tanto a la cadena de suministro y repostaje como a la adecuación de la cadena de tracción y análisis de sensibilidad asociado a la amortización de la misma durante la vida útil de la tecnología.
 - Opex: coste de la materia prima incluyendo análisis de sensibilidad durante la vida útil de la tecnología.
 - Eficiencia en el uso: mejora en el nivel de consumo, costes de O&M (coste de la no disponibilidad vs mantenibilidad)
 - Reducción de emisiones: sostenibilidad en el ciclo de vida de la energía mediante criterio de análisis “Wheel To Wheel”.

En definitiva, un conjunto de criterios que, debidamente ponderados, evite el mantener en el sector ferroviario una realidad energética y tristemente global: se mantienen y animan los debates acerca de qué es lo mejor sin considerar que durante el tiempo de discusión, excesivo en ocasiones, es posible evitar un daño a posteriori irreparable

máxime cuando lo mejor, en ocasiones, puede incluso no ser nunca viable, e impulsemos el aprendizaje de los errores cometidos con el ferrocarril, como por ejemplo algunos de los habidos por “falta de visión de futuro” y valentía durante los años 60’s a 80’s en España que provocaron el cierre de algunas líneas para las que un análisis similar al presente fue realizado y no escuchado en aras de una modernidad mal entendida...

6. Análisis de Alternativas

Desarrollemos el análisis de los cuatro combustibles alternativos en conformidad con los criterios planteados:

6.1 Seguridad del suministro

La seguridad de suministro de un combustible depende de varios factores, siendo los principales a los efectos del presente análisis y de garantizar la debida resiliencia de la atención a la demanda, los siguientes:

- La Disponibilidad del Recurso:

De los cuatro combustibles evaluados el gas natural es el que mayor disponibilidad presenta precisamente por ser un recurso “natural” y no ser o un “subproducto” derivado de otras fuentes de energía (el GLP es un subproducto de refinería y por tanto su producción es limitada y el Hidrógeno, a pesar de que presenta mayores alternativas de producción (tanto fósiles como renovables), en la actualidad es también en un 95% producido en refinerías) o un recurso ligado al aprovechamiento tanto de residuos (economía circular), como de recursos agrícolas, y por tanto limitado en su capacidad de atender de forma sostenible la demanda global de energía de la actividad humana en general y de movilidad en particular.

Europa dispone de una capacidad de “entrada” de Gas Natural de 21,7 TWh/día de la que un 34% se encuentra en las 23 Plantas de Regasificación existentes (gráfica 3), lo que supone un equivalente y porcentual incremento de la resiliencia del sistema al permitir la conexión de las mismas con cualquier punto de suministro mundial. En la actualidad el factor de utilización de dicho sistema es del 62% lo que permite sin mayor inversión adicional la atención del 32% de la demanda energética del sector movilidad europeo.

- La Flexibilidad de su cadena de suministro:

Dos aspectos deben de ser considerados para evaluar este factor, la complejidad y la madurez de la cadena logística.

- Complejidad, la que depende a su vez de:

- El origen de la energía (autogeneración/importación y por tanto el número de elementos “aguas abajo” que intervienen en la cadena): así mientras que los combustibles fósiles y sus derivados dependen, tal y como hemos adelantado, en buena medida de la importación y por tanto sus cadenas logísticas requieren de la participación de más elementos para su transporte hasta el consumidor final, los combustibles renovables dependen casi exclusivamente de la autogeneración y por tanto su cadena logística se reduce notablemente.
- La Densidad Energética Diferencial: es quizás el factor más determinante a la hora de determinar la viabilidad de la sustitución de un combustible por otro en un segmento determinado de movilidad, tanto porque dicha densidad determinará la capacidad de asegurar la misma autonomía como, en caso contrario, el “estado” en el que la misma debe de ser suministrada y almacenada a bordo para conseguirlo, lo que a su vez supondrá o nuevos “añadidos” a la cadena logística o en el caso de que dichos “estados” no sean tecnológicamente alcanzables de forma competitiva, un claro condicionante al empleo de dicho combustible en un determinado segmento de movilidad.

- Madurez

De entre los combustibles alternativos, las cadenas de suministro asociada tanto a la distribución de productos petrolíferos (+ 100 años de experiencia) como al gas natural (+ 50 años de experiencia) son las más maduras, no existiendo ni experiencia comercial ni tecnología probada para el resto de alternativas, las que además en la actualidad están orientadas mayormente a conseguir su introducción en el mercado de forma progresiva desde la producción distribuida y de pequeña escala.

Si bien las asociadas a los productos petrolíferos disponen en la actualidad de la ventaja competitiva de disponer de una red comercial más amplia y madura en lo relativo a utilización en todos los segmentos de movilidad, la del gas natural se encuentra en disposición de resultar tan competitiva como esta a corto plazo en base a:

- En países como España, existe un sistema de suministro a cliente final mediante camiones cisterna que a la fecha acumula más de 1 millón de operaciones y más de 500 destinos activos en todo el territorio nacional.
- La Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2014 para la implantación de infraestructuras para suministro de combustibles alternativos en la movilidad prioriza en el horizonte 2025 el desarrollo del GNC y del GNL (frente a otros combustibles que recomienda pero para los que no se establecen medidas específicas) tanto en la movilidad terrestre como en la marítima, estableciendo para la primera distancias medias en la RTE-T entre puntos de suministro de 150 y 400 Kms respectivamente y, para la segunda, infraestructuras en el conjunto de los puertos de la red core lo que supondrá un reforzamiento a la demanda y por ende a la logística de GNL que favorecerá la resiliencia del conjunto del sistema de abastecimiento. España lidera el proyecto Core LNG Gas Hive que asegurará el adelanto a 2020 de las infraestructuras y logísticas requeridas en el ámbito marítimo.
- La versatilidad logística del GNL permite, como ha demostrado en España durante el proceso de gasificación desarrollado desde principios de los 70's hasta los primera década de este siglo, disponer tanto de GNL y a partir de este GNC para abastecer cualquier segmento de movilidad en función de la densidad energética requerida (gráfica 3).

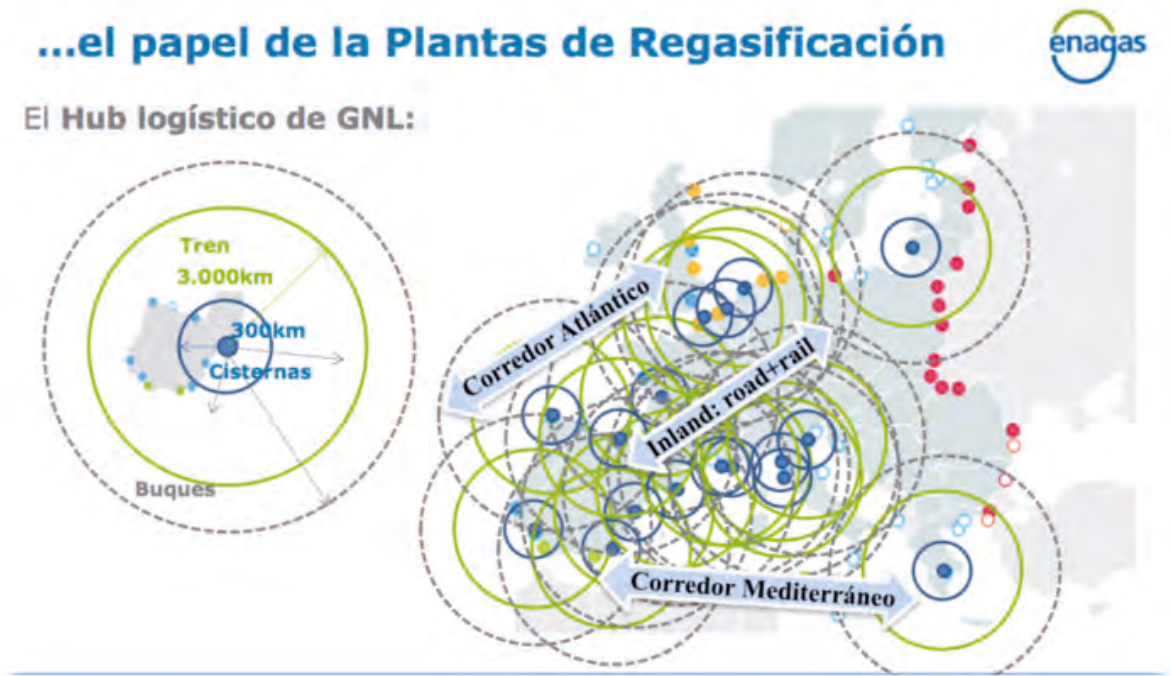
El resto de combustibles presentan, en lo relativo a su logística de distribución, mayores limitaciones, así por ejemplo:

El Hidrógeno presenta dos grandes limitaciones en cuanto a su logística:

- El transporte a presión y fase gas es viable pero muy poco rentable debido a la muy baja densidad energética del Hidrógeno.
- El transporte por tubería está condicionado tanto por la no disposición de redes de transporte propias, como por la limitación que en cuanto a su mezcla con gas natural (el 20%) limita el empleo de la extensa red europea de gasoductos.
- El transporte alternativo del mismo en fase líquida y criogénica, necesario por otro lado para asegurar la presencia de este vector energético en el más amplio portfolio de aplicaciones en movilidad, es muy complejo y a la fecha no se ha resuelto para aplicaciones de movilidad, debido a su elevada inestabilidad en fase líquida por su bajo punto de ebullición y por tanto necesidad de muy exigente grado de aislamiento y tratamiento de gases generados.

En atención a todos estos factores, si bien el gas natural dispone de la cadena logística más compleja, el nivel de madurez tecnológica, el volumen y distribución de instalaciones y el amplio y creciente número de puntos de suministro y alternativas logísticas de gran eficiencia y

competitividad para atender la demanda, la convierten en mucho más resiliente que cualquier otro combustible alternativo (gráfica 3).



6.2 Madurez tecnológica

Desde el punto de vista de las “motorizaciones” utilizables para el “consumo” directo de los combustibles alternativos analizados y generación de energía de tracción existen dos “plataformas” claramente diferenciadas:

- Los motores alternativos de combustión interna (MACI´s): utilizados desde hace más de 130 años, han demostrado su versatilidad y capacidad de adaptación a nuevos combustibles o mezclas de ellos tanto mediante transformación en soluciones duales (mejora de prestaciones mediante mezcla de combustible) como mediante desarrollo de tecnologías que permitan su empleo dedicado a un nuevo combustible, presentando por tanto la mejor solución para facilitar la introducción de cualquier nuevo combustible y siendo por tanto la tecnología adecuada para el gas natural, los GLP´s, así como mezclas tanto de biocombustibles como de Hidrógeno. Su principal ventaja es la madurez (actualmente se emplea esta tecnología en todos los sectores de movilidad y existen cerca de 2.000 millones de vehículos en el mundo), la fiabilidad, la vida útil y el rango de potencias. Su principal limitación se encuentra en el rendimiento, que como media no supera el 30%.

De entre los combustibles alternativos, la tecnología que cuenta con más vehículos y mayor rango de potencias en uso y segmentos de movilidad es el gas natural:

- Más de 20 millones de unidades en servicio, en especial en vehículos pesados, ligeros para carretera, pero sin abandonar una presencia con una clara expectativa de desarrollo en el sector marítimo donde ya cuenta con 400 buques que lo utilizan de forma comercial como combustible.
- Rango de potencias de hasta 90.000 cv y soluciones 100% Gas Natural hasta 460 cv (los GLP´s tan solo competirían hasta en este rango de potencias).

- Pila de hidrógeno: aunque la tecnología es conocida desde hace muchos años, su desarrollo ha sido intermitente y siempre asociado a crisis energéticas o a cambios regulatorios de tipo medioambiental como ocurrió tras la crisis del petróleo de los 70´s o está ocurriendo en la actualidad, lo que no le ha permitido desarrollar ni experiencia suficiente ni por tanto un número de fabricantes con capacidad de producción suficiente como para garantizar la disposición de una plataforma de sustitución competitiva habida cuenta del volumen del parque mundial y las expectativas de crecimiento del mismo en el horizonte 2050. Su principales ventajas y desventajas son totalmente opuestas a las de los MACI´s:
 - Principal ventaja:
El alto rendimiento que supera el 50%.
 - Principales desventajas:

Las que derivan de la falta de madurez y experiencia en el uso, en especial la vida útil (entre un 25 y 50% inferior a un MACI), la falta de fiabilidad, la limitación de uso en determinadas condiciones exteriores, o la limitación en potencia: actualmente equivalente a la del segmento DMU.

A la fecha no existen aplicaciones comerciales sostenibles sin subvención, debiendo destacar el fuerte apoyo oficial en Europa Central y especialmente en Alemania se va a dar a su empleo en el sector ferroviario y segmento DMU, donde actualmente se están licitando 11 concursos que permitirán disponer en 2021 de hasta 300 unidades DMU en operación.

6.3 Seguridad

El empleo de cualquier combustible alternativo conlleva la adaptación de la operativa del nuevo usuario a las particularidades del mismo, lo que puede suponer un cambio cultural que puede convertirse en uno de los factores más determinantes en el éxito de la gestión del cambio.

En el caso del gas natural, sus particularidades diferenciales respecto al resto de combustibles fósiles son:

- En fase gaseosa:
Elevada volatilidad y un reducido intervalo entre el límite inferior y superior de inflamabilidad.
- En fase líquida:
 - Por su mayor densidad energética y la menor volatilidad en los momentos iniciales de una fuga, un mayor riesgo de concentración que en fase gaseosa.
 - Por la continua vaporización de la fase líquida en el interior de los tanques de almacenamiento, un incremento de presión que puede producir el disparo de las válvulas de seguridad.

Estas particularidades no son limitantes para su empleo en la movilidad, tal y como han demostrado desde hace cerca de 50 años los indicadores de seguridad tanto de la industria gasista en general como de movilidad con gas natural en particular, con ausencia de accidentes destacables en base al desarrollo tanto de una tecnología de detección, aislamiento y contención específica, como a la elaboración, previo a cualquier implantación en un segmento de movilidad específico, de análisis de riesgos y estudios de seguridad extendidos a todo el ciclo de vida de uso del combustible (repostaje, operación y mantenimiento de vehículos con gas natural como combustible).

En el caso particular del ferrocarril y previo a la fase de explotación comercial, dichos estudios deben de considerar, además, las particularidades específicas de la operación ferroviaria, como los túneles, la presencia de catenaria y muy especialmente los riesgos de impacto, aspecto este especialmente muy avanzado en la actualidad en base a la experiencia de uso y transporte de GNL por ferrocarril en Norteamérica.

A pesar de las particulares condiciones de seguridad que el empleo del gas natural conlleva, los riesgos en el uso no son especialmente diferentes tanto a los del GLP (más pesado que el aire), como muy especialmente el Hidrógeno, mucho más inestable en fase líquida y que en fase gaseosa, para compensar su inferior densidad energética, requiere trabajar a una presión muy superior a la del gas natural.

6.4 Hibridabilidad

El ferrocarril es sin duda el medio de transporte en el que más se consigue extender, mediante transformación, la vida útil de los vehículos empleados, lo que si bien supone una solución competitiva a efectos de reducción de los costes operativos, supone un condicionante ante cambios normativos, como el presente, donde los mismos tienen que ser capaces de ser tan competitivos para la dotación de los vehículos nuevos, como muy especialmente de los existentes al ser el parque objetivo a corto plazo mucho mayor.

En este sentido es obvio que aquellos combustibles capaces de utilizar motorizaciones o bien equivalentes o mediante transformación de las existentes serán más fácilmente adaptables, tanto técnica como operativamente:

- Al minimizar los elementos y conocimientos tecnológicos requeridos para asegurar la operación y mantenimiento de los nuevos componentes implementados.
- Al disponer de un mayor número de potenciales proveedores con tecnología y capacidad de producción suficiente para no resultar un factor limitante del proceso de transición requerido.

Pero tan importante como la motorización, lo es el volumen (y peso) del depósito necesario para almacenar la energía capaz de aportar una autonomía equivalente a la del combustible a sustituir:

Diesel	GLP	GNL	GNC	H2-gas
1	1,4	1,6	4,5	33,0

Por tanto, y desde este punto de vista, el gas natural es el combustible alternativo que presenta una mayor ventaja competitiva al ser el único aplicable tanto por transformación como por sustitución de la motorización existente en todos los segmentos de movilidad ferroviaria con el menor cambio tecnológico y el menor impacto en volumen y peso en lo relativo a almacenamiento de energía para asegurar un mismo nivel de autonomía.

6.5 Precio

Desde el punto de vista de precio de la materia prima el gas natural presenta:

- El precio más competitivo (*):

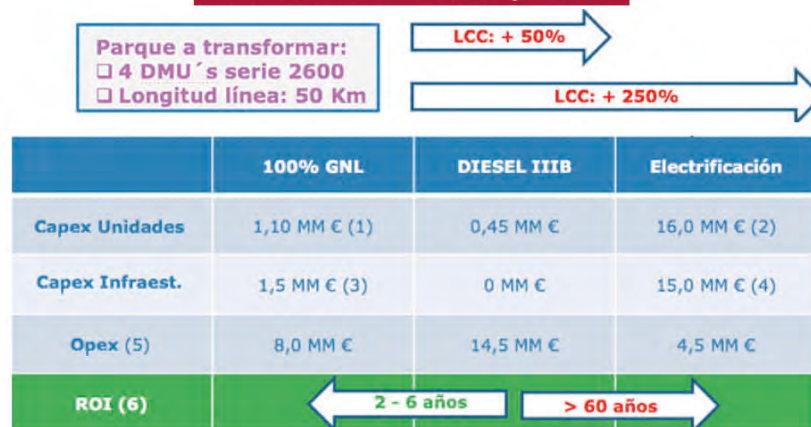
Diesel	H2-gas	GLP	GNL
1,32	1,16 (-13%)	0,71 (-46%)	0,71 (-46%)

(*) €/Km en base a experiencias en sector ferroviario.

- Y el más estable de entre los fósiles en los últimos 10 años.
Valores que sumados a la madurez tecnológica e hibridabilidad analizadas, permiten:
 - Unos retornos de inversión muy competitivos en comparación con las soluciones

“tradicionales” y para cualquier segmento ferroviario, tal y como se refleja en los “Business Case” adjuntos desarrollados tanto para el segmento de media distancia de viajeros (BC-1) como mercancías (BC-2).

Business Case Heavy Haul:



- Notas:**
- (1) El mayor coste diferencial se debe un 40% al motor y un 60% al sistema de almacenamiento y combustible
 - (2) Se considera sustitución por unidad de nuevo diseño
 - (3) Incluye punto de suministro y adecuación de talleres para labores de mantenimiento conforme ATEX
 - (4) Electrificación + Subestaciones
 - (5) Mantenimiento y consumo de energía de los equipos de tracción durante 20 años
 - (6) Debido al alcance de (3) un incremento progresivo de las unidades adscritas al depósito mejora notablemente el ROI: (+ 4 DMU´s mejora ROI un 30%) siendo éste más sensible y cierto al número de unidades que al precio del petróleo (incierto e inestable a largo plazo)

Business Case DMU's:



- Notas:**
- (1) El mayor coste se debe un 40% al motor y un 60% al sistema de almacenamiento (isocontenedor criogénico sobre plataforma de coste no considerado por existente) y equipo inyección combustible.
 - (2) Se considera sustitución por unidad de nuevo diseño dual tritensión.
 - (3) Incluye punto de suministro y adecuación de talleres para labores de mantenimiento conforme ATEX
 - (4) No se considera su coste al tratarse de una unidad dual con el objeto asegurar misma versatilidad GNL.
 - (5) Mantenimiento y consumo de energía de los equipos de tracción durante 20 años (Loco Dual: 30% diesel/70% eléctrica)
 - (6) Debido al alcance de (3) un incremento progresivo de las unidades adscritas al depósito mejora notablemente el ROI: + 1 unidad de tracción (2 locomotoras) mejora ROI un 30%, siendo éste más sensible y cierto al número de unidades que al precio del petróleo (incierto e inestable a largo plazo)

BC-1: Análisis rentabilidad transformación segmento viajeros

- Así como unos márgenes que incluso permitirían mejorar las emisiones mediante mezcla con otros combustibles menos competitivos desde el punto de vista precio pero que mejorarían aun más el impacto medioambiental, como el biogás (entorno a 3 veces más costoso) o el propio hidrógeno mediante mezclas de los mismos no superiores al 20%.

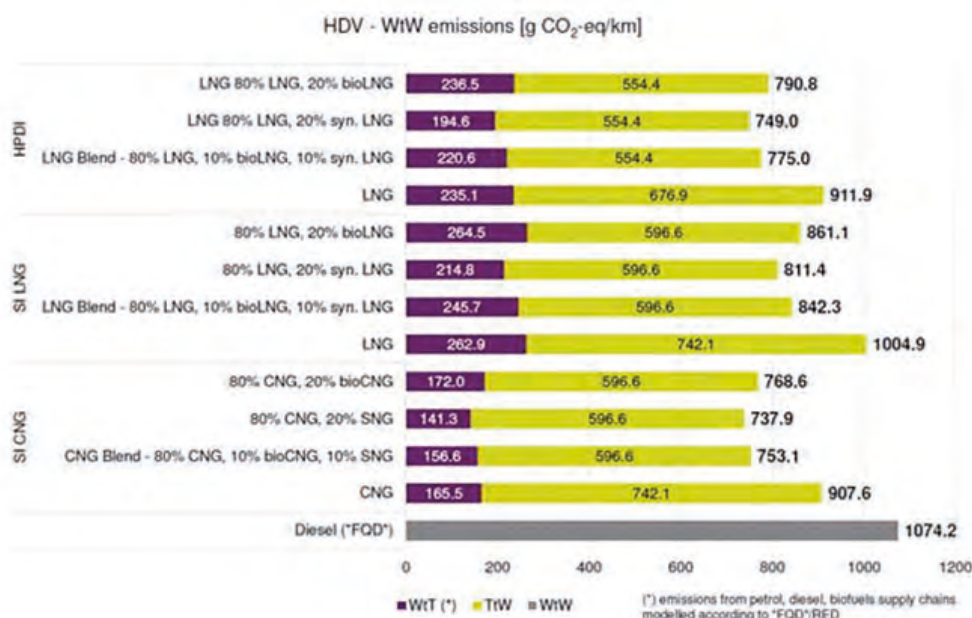
6.6 Eficiencia en el uso

Los principales factores de comparación de la eficiencia en el uso de los diferentes combustibles alternativos son la mantenibilidad y fiabilidad de los nuevos elementos introducidos en la cadena de tracción del vehículo: motor y almacenamiento de energía.

- En el caso del empleo del gas natural y el GLP, en el uso de los diferentes combustibles alternativos son la mantenibilidad y fiabilidad de los nuevos elementos introducidos en la cadena de tracción del vehículo: motor y almacenamiento de energía.
- En el caso del empleo del gas natural y el GLP, estos utilizan derivados o transformaciones de motores convencionales que en cualquier caso reducen sus necesidades de mantenimiento en base a la mayor "limpieza" del combustible, reduciendo la mantenibilidad e incrementando la fiabilidad. En cuanto a los sistemas de almacenamiento, estos tan solo introducen mayores necesidades de verificación de su integridad a los efectos de minimizar el riesgo de fugas.
- Los sistemas que emplean hidrógeno si bien eliminan las partes móviles conllevan mayores costes de mantenimiento al requerir tanto la sustitución del regenerador con una frecuencia dependiente de la tecnología empleada y un coste equivalente al 50% de la inversión inicial de la propia célula, como la batería de almacenamiento, tecnología que si bien ha reducido notablemente su coste e incrementado su densidad energética aún no permite, junto a la célula una vidas útil equivalente a la de un motor de combustión interna (> 20 años). Estos factores, ligados a la falta de experiencia en el uso suficiente suponen un notable hándicap en cuanto a la fiabilidad y disponibilidad obtenible en uso comercial.

6.7 Reducción de emisiones

Desde el punto de vista emisiones directas, valoradas estas en modo WTW (Well to wheel), la utilización del Gas Natural permite reducir entre un 15 y un 30% (Gráfica 4) el impacto medioambiental en los diferentes tipos de motorizaciones y con diferentes opciones de empleo de combustibles comprimidos, licuados y/o con mezcla de biogás.



Gráfica 4: Análisis WTW comparativo CNG/LNG vs Diesel
(Fuente: NGVA-Thinkstep 2017)

Si además consideramos que su empleo:

- No genera impacto ambiental indirecto, como ocurre con el tratamiento de los residuos que genera la sustitución del regenerador y la batería de una célula de hidrógeno para extender su vida útil en equivalencia al tren de tracción de un MACI.
- Que se minimizan las externalidades que dichas emisiones producen, muy especialmente en lo relativo a nivel de ruido y a calidad del aire al no emitir prácticamente NOx, y cero en el caso del SOx y PM, cuyo efecto en la UE se cifra en 400.000 muertes prematuras (29.000 en España).

El gas natural presenta no solo una posición muy competitiva, sino la posibilidad de mejora asociada a la introducción progresiva del biogás.

En resumen:

En resumen (Gráfica 5), el gas natural es la alternativa más competitiva y la única ya disponible para iniciar una transición inmediata en todos los segmentos de movilidad en general y el ferrocarril en particular.

	GLP	GN	BIO	H2
Seg. Suministro	Amarillo	Azul	Amarillo	Amarillo
Precio	Verde	Azul	Amarillo	Rojo
Capex	Amarillo	Verde	Amarillo	Rojo
Eficiencia Uso	Verde	Azul	Amarillo	Amarillo
Emisiones	Rojo	Amarillo	Verde	Azul
Madurez Tec.	Verde	Azul	Amarillo	Amarillo
Seguridad Uso	Amarillo	Verde	Verde	Amarillo
Hibridabilidad	Verde	Azul	Amarillo	Rojo

Rojo: entre 0 y 2
 Amarillo: entre 3 y 4
 Naranja: entre 5 y 6
 Verde: entre 7 y 8
 Azul: entre 9 y 10

Gráfica 5: Resumen competitividad comparativa entre combustibles alternativos. (Fuente: Enagás)

7. Estado del Arte utilización del Gas Natural como combustible en el ferrocarril.

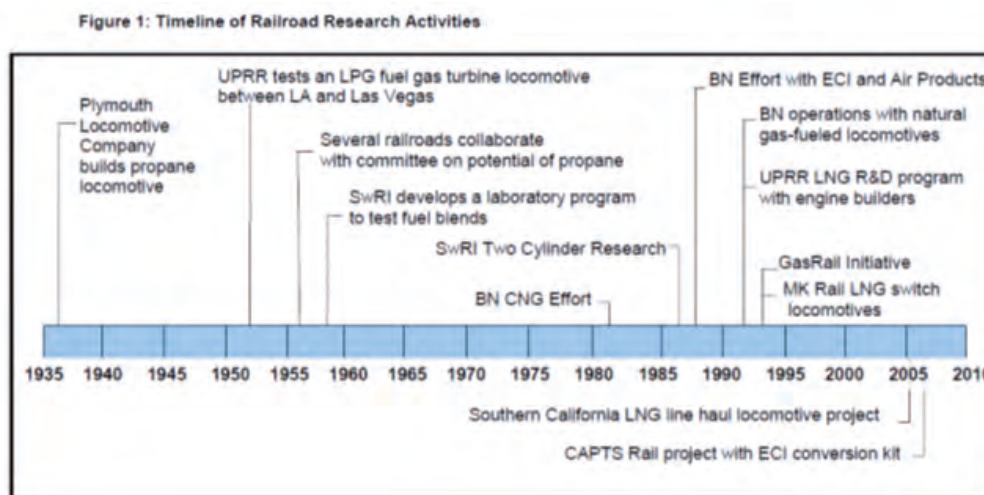
En la actualidad se puede considerar que, con mas de 20 MM de Vehículos en servicio, tanto la logística como la tecnología de uso del gas natural como combustible para motores alternativos en potencias de hasta 400 hp se encuentra madura, y resulta especialmente competitiva en flotas de servicios punto a punto donde el “dilema” de las infraestructuras de suministro no resulta un condicionante.

En otros segmentos, como el marítimo o el ferrocarril, su uso está menos extendido, entre otros factores por:

- La particularidad de sus motorizaciones (altas potencias >> 1.000 hp, desarrollos específicos y series “cortas”) y las consecuentes estrategias de los “pocos” fabricantes de motores por sector: inversión condicionada a la certidumbre de venta de un número de unidades suficiente para asegurar su amortización.
- La necesidad de una mayor volumetría de almacenamiento para asegurar idéntica autonomía (en la mayor parte de aplicaciones el CNG no es una alternativa)
- Una regulación medioambiental “laxa” especialmente en los plazos de exigencia y que en muchas ocasiones no considera el problema de la calidad del aire, aspecto en el que el Gas Natural presenta mayores ventajas.
- Falta de posicionamiento sectorial “gasista” competitivo en dichos sectores.

En el caso concreto ferroviario, y a pesar del peso que las motorizaciones de hasta 400 hp tienen en el parque mundial de tracción (en especial en el caso europeo donde aproximadamente es del 50-50) y al margen de desarrollos muy puntuales de “motorizaciones alternativas (gasógenos vs turbinas de gas)”, la totalidad de las experiencias se han desarrollado en el intervalo de potencias entre 1.200 y 4.100 hp.

La mayor parte de las experiencias (gráfica 6), han sido desarrolladas en Norte América (USA y Canadá), fundamentalmente asociadas a procesos de mejora del coste de operación y/o a impulsos regulatorios derivados de las perspectivas de mayor exigencia de las reglamentaciones medioambientales.



Gráfica 6: Histórico de experiencias uso gas como combustible en el FFCC
(Fuente: Association of American Railroads - 2007)



Fotografía 1: Locomotora experimental a propano (1936 - 1980).
(Fuente: Museo de Transporte de Kirkwood)

No obstante lo cual, resultan destacables algunas otras experiencias puntuales desarrolladas en otros países como:

Perú:

El ferrocarril central Andino inició en 2005 un proceso de transformación del parque de tracción utilizado en las líneas de los Andes debido al impacto en su cuenta de resultados del coste del combustible diésel utilizado hasta entonces. Dicha transformación consistió en la adaptación de los motores para utilizar GNC, y aprovechar los precios muy competitivos pactados a largo plazo (30 años) con un distribuidor local que aprovechaba las reservas de los yacimientos de Camisea, manteniendo una motorización dual que le permitía mantener el uso del diésel en las puntas de mayor necesidad de potencia (ascensos). Desde 2007, finalizado a satisfacción el período de pruebas inicial, opera de forma regular su parque de locomotoras que mantienen el depósito diésel y llevan acoplada una plataforma sobre la que transporta un contenedor de GNC.

India:

Ha lanzado un proyecto de mejora de la sostenibilidad de sus ferrocarriles, mediante un ambicioso plan que contempla la sustitución progresiva de todos los combustibles y energías fósiles utilizadas en su actividad (tanto tracción como consumos auxiliares) y que coordina el IROAF (Indian Railways Organization For Alternative Fuels). En lo que respecta a la tracción, las primeras experiencias se centran en la introducción de biofuel y GNL, ámbito este en el que ya dispone de dos unidades autopropulsadas de viajeros en las que el GNL alimenta el 20% del consumo de su motor dual. Recientemente ha presentado un proyecto para extender esta tecnología a un parque de entre 10 y 40 unidades y conseguir un nivel de “dualidad” de hasta el 40%, así como anunciado que trabaja para desarrollar una prueba piloto en el segmento Heavy Haul.

Rusia:

Tras el desarrollo dos pruebas piloto de motorizaciones con GNL: una turbina aeroderivada,

previamente utilizada para una prueba en un vehículo aéreo es, y un interesante prototipo de construcción de una locomotora modular del tipo “switcher”, se confirma que estas o similares unidades pasarán a prestar servicios comerciales en la línea Obskaya-Bovanenkovo que atendiendo las necesidades de los campos de gas e instalaciones de licuefacción de la península de Yamal.

Norte América:

En cuanto a las experiencias del sector ferroviario de Norte América, podemos diferenciar dos etapas de pruebas diferenciales:

Primera etapa (2000-2010):

En la misma la reglamentación de emisiones de referencia fue la Tier 2, y en la misma se llevaron a cabo las siguientes pruebas por segmento y tipo de combustible:

- DMU´s (<1000 hp): 0
- Switchers (1.000 - 2.000 hp): 5 CNG
- Heavy Hauls (> 2.000 hp): 6 GNL

En general los resultados de dichas pruebas en vía (y otras tantas que no pasaron de la prueba estática en banco) permitieron avanzar en la mejora del conocimiento sobre los pros y contras de las diferentes tecnologías de combustión aplicables (Spark Ignition, Low Pressure y High Pressure) y avanzar en el desarrollo de criterios de aplicación del GNC y GNL según autonomía y condiciones de operación requeridas, a pesar de su corta duración (media de 2 años) pero el resumen presentado por el regulador no fue positivo, puesto que tanto en lo relativo a potencia y rendimiento como a emisiones no se consiguió mejorar los resultados de la tecnología diésel en uso en la mayoría de los casos.

Dichos resultados podríamos decir que eran esperables por los motivos siguientes:

- Falta de consideración a las tecnologías de éxito y experiencia por entonces alcanzado en el sector carretera.
- Poca disposición e implicación de los fabricantes de motores al desarrollo de motores específicos ante la incertidumbre de demanda y el alto coste de la inversión en I+D necesaria, lo que supuso el empleo de motores diésel existentes transformados, lo que en si no habría sido un problema si no hubiese sido por el hecho de que a diferencia de otros sectores, en el Heavy Haul norteamericano buena parte de la tecnología hasta entonces utilizada se basaba en el desarrollo de soluciones estacionarias basadas en tecnologías de más de 30 años de antigüedad, válidas para el nivel de exigencia diésel de entonces pero muy limitadas en especial en cuanto al nivel de “calidad” requerido para un correcto monitorizado y eficiencia en la inyección de gas natural, imprescindible para optimizar la misma y evitar tanto fenómenos de combustión incompleta como de detonación, íntimamente ligados con la “calidad” de la potencia esperada.
- Ídem por parte de los operadores ferroviarios ante lo que entonces se veía como un fuerte condicionante al nivel de “interoperabilidad” entonces existente y que permitía asegurar el mantenimiento de la tracción de un operador sobre el corredor de otro y de este modo minimizar los costes del servicio, puesto que con el cambio de combustible o era necesario asegurar la implantación de un sistema de repostaje de GNL a lo largo de toda la red (con una tecnología e infraestructura entonces inexistentes) o retomar el cambio de tracción, lo que en cualquier caso suponía mayores costes.



Fotografía 2: Locomotora experimental Union Pacific.
(Fuente: Association of American Railroads - 2007)

Segunda etapa (a partir de 2010 a la fecha):

En este período, se reactivan las pruebas y amplia de forma progresiva su alcance por los motivos siguientes:

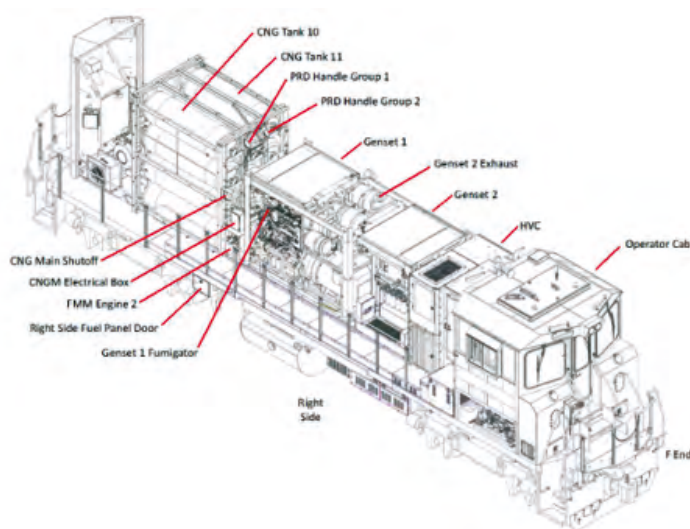
- Un precio muy competitivo: la revolución del shale-gas y el impacto de esta en la seguridad de suministro abre una ventana de oportunidad al gas natural como combustible alternativo respecto a la situación del período anterior de pruebas, el precio de referencia del petróleo se multiplica por 2.5 mientras que el del gas natural se “desacopla” de este y abre un mayor ratio con este (de 7:1 a 20:1).
- Un endurecimiento de las exigencias medioambientales (reducción diferencial Tier 4 vs Tier 2):
 - NOx: - 76%
 - PM: - 70%
 - HC: - 54%

En la misma la reglamentación de emisiones de referencia fue la Tier 4, y en la misma se llevaron a cabo las siguientes pruebas por segmento y tipo de combustible:

- DMU´s (<1000 hp): 0
- Switchers (1.000 - 2.000 hp): 2 (19 en transformación), todas en CNG
- Heavy Hauls (> 2.000 hp): 11 en pruebas (4 LP, 6 HP y 1 GNC) + 22 en proceso de transformación (22 LP)

En general los resultados de dichas pruebas están siendo satisfactorios, y aunque aun no han sido publicados los resultados de la fase de prueba en vía, ya se encuentran en cartera otros

tantos proyectos piloto con los que el conjunto de las principales compañías ferroviarias norteamericanas (los denominados Clase I), se están programando fases de entrada en operación comercial (BNSF ya dispone de un permiso de la Autoridad Federal para extender sus pruebas a líneas principales, Florida East Coast ha decidido transformar el total de nuevas unidades adquiridas para sus líneas principales, y el Indiana Harbor Belt ha iniciado el proceso de transformación del total de su flota de locomotoras de maniobras) de unidades e incluso se anuncian ya tanto un primer desarrollo de un nuevo motor 100% GNL para 2017, como un modelo “cero emisiones” para Gas Natural Renovable en 2018, lo que podemos traducir como un síntoma muy positivo de la bondad de los resultados que se están encontrando y de la oportunidad que presentan.



Esquema 1: Locomotora tipo “Genset” a GNC
(Fuente: India Harbor Railroad - 2017)

En particular, este período ha permitido:

- Descartar algunas de las opciones testadas en el período anterior y progresar en el desarrollo de soluciones en las que el % de mantenimiento de inyección diésel se va reduciendo de forma progresiva mediante la identificación de los factores de diseño a considerar para la evolución hacia una motorización 100% gas más competitiva que permita alcanzar los resultados medioambientales que la no utilización parcial de diésel permitirían (las actuales solo permiten cumplir TIER 3 como consecuencia del complejo equilibrio de diseño establecido para conseguir a la vez bajas emisiones de NOx, PM y CH4 bajo un diseño de ciclo diésel y mezcla de combustibles):
- Potencia: es necesario validar cómo varía su curva de potencia y consumo con la configuración dual con gas (nivel de carga vs % de sustitución diésel) conforme al perfil de trabajo esperado en línea. El nivel máximo de sustitución no supone un valor medio sino un máximo inversamente correlacionable con la carga aplicada:
 - En el caso de las motorizaciones LP se observa que para 100% de carga se consigue tan solo un 50% de sustitución, mientras que a cargas bajas se obtiene la máxima sustitución del 80%.
 - En el caso de las motorizaciones HP se observa que para 100% de carga se consigue una sustitución del 95%, mientras que a cargas bajas se obtiene la máxima sustitución del 99%. Respuesta a transitorios: íntimamente ligado al punto anterior.

- Sensibilidad al número de metano: las calidades de GNL aceptadas en las terminales de regasificación (como ocurre en el caso español) pueden ser muy amplias, motivo por el que una limitación en este aspecto podría requerir de un proceso más costoso de suministro para adecuar las calidades a cargar en dichas terminales para uso ferroviario. La introducción de CH₄ en la cámara de combustión con ciertos números de metano podría generar “knocking” y por tanto pérdidas de rendimiento y/o problemas operativos. Dicho fenómeno es más fácilmente evitable mediante sofisticación de los sistemas de control y/o mediante la inyección a alta presión limitando la presencia del CH₄ a lo largo de cada ciclo de trabajo del motor.
- Emisiones: las que en función de la tecnología de inyección empleada, y en especial siempre que se mantenga un cierto nivel de dualidad diésel, pueden estar lejos de los resultados esperables para el caso de un motor 100% gas natural, en especial en lo relativo a NO_x y PM, precisamente donde más exigentes resultan las evoluciones normativas aplicables (Tier IV implica reducir, frente a TIER III, un 76% los NO_x y un 70% las PM). Además es preciso establecer procesos de verificación de las emisiones de metano asociadas a los procesos de utilización del gas natural como combustible pues en este tipo de segmento de tracción y motorización las mismas pueden suponer hasta un 20% del total de las emisiones de CO₂e y, por tanto, suponer una notable mejora competitiva habida cuenta de su impacto en el TTW total.
- Coste de inversión: asociada tanto a la propia tecnología como a la necesidad de completar la misma con soluciones de post-tratamiento en función de los resultados obtenidos en el apartado emisiones.
- Coste de operación: tan condicionado por el nivel de sustitución diésel alcanzable como por el mantenimiento diferencial asociado a las exigencias de los sistemas de inyección y control de la misma empleados, así como en su caso a los sistemas de post-tratamiento a implementar.
- Incrementar la implicación de los principales fabricantes de motores: Caterpillar y GE que ya disponen de soluciones comerciales:
 - GE: ha desarrollado motorizaciones Dual Fuel (que distribuye bajo la marca “Nextfuel”) con inyección a baja presión y un máximo de sustitución diésel de hasta el 80%, y a la fecha, aunque no ha publicado las características de dicha motorización, informa que ha alcanzado un nivel de emisiones conforme a Tier III.
 - Caterpillar: por medio de su alianza con Westport desarrolla soluciones Dual Fuel con inyección a alta presión y un nivel de sustitución diésel superior al 95%. A la fecha, aunque no ha publicado las características de dicha motorización, informa que ha alcanzado un nivel de emisiones conforme a Tier III.
- Desarrollar de una nueva industria auxiliar especializada tanto en transformación (Westport) como sistemas de transporte, almacenamiento y repostaje (Chart).
- Mejorar la regulación aplicable: tanto en lo relativo a las normas de uso (la NFPA 52 “Vehicular Natural Gas Fuel Systems Code” en su edición 2016 ha eliminado las “restricciones” a su aplicación al caso ferroviario existentes en ediciones anteriores), como en cuanto al transporte de GNL como combustible en vehículos “tender” y los estudios de seguridad a ellos asociados (en especial por la criticidad que se identifica al proceso de “transferencia y acondicionamiento del combustible” entre el “tender” y la locomotora), lo que facilita el paralelo desarrollo de normativa específica aplicable no solo al uso, sino también al transporte de GNL por ferrocarril.



Fotografía 3: Desarrollo de pruebas en vía locomotoras duales GNL del Florida East Coast Railroad
(Fuente: Chart Industries- 2017)

8. La “hoja de ruta” de Renfe.

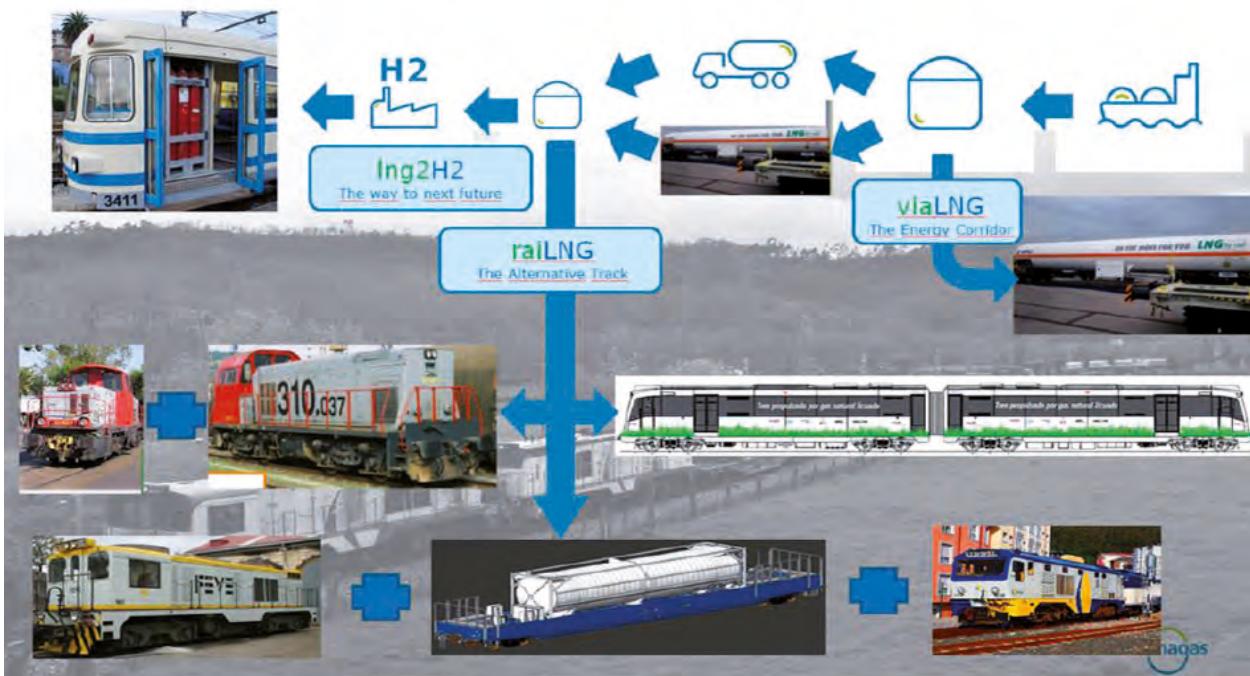
Dichos resultados suponen un avance necesario pero no suficiente desde el punto de vista de extrapolación de los mismos a otras condiciones de uso, en especial las aplicables a la Unión Europea, fundamentalmente porque es necesario:

- Disponer de pruebas de extrapolación de las tecnologías “road” al “rail” para segmento DMU’s:
 - Son las líneas de menor interés estratégico a nivel global, y por tanto las que en el corto, y quizás medio plazo, no se van a encontrar dentro de planes concretos de actuación en el horizonte 2030, en el que las líneas de actuación prioritaria de seguro serán cual las grandes líneas de viajeros, en especial de Alta Velocidad, y corredores de mercancías transnacionales.
 - Son las líneas en las que las condiciones de competitividad son más exigentes (incluso para las soluciones basadas en electrificación, fundamentalmente por el gran impacto del factor de utilización) y por tanto el mejor escenario para demostrar la competitividad de soluciones alternativas:
 - El segmento de potencias es similar al de carretera tanto viajeros como mercancías por lo que las soluciones alternativas se encuentran más maduras.
 - El riesgo asumido durante la fase de pruebas es “muy bajo” precisamente por el factor de utilización de las líneas, sin embargo la potencialidad de impacto de sus consecuencias positiva es “muy alta” porque en este tipo de líneas no operan vehículos de diseño específico, sino la mayoría de vehículos no eléctricos del segmento con mayor potencial de crecimiento conforme a las estimaciones de la propia UIC y utilizadas en el conjunto de líneas “no secundarias”.
- Desarrollar, particularizar y completar la regulación aplicable al ciclo de vida del combustible (repostaje, operación, almacenamiento, mantenimiento en carga): existen referencias del sector “carretera” pero debe de completarse y particularizarse el “mapa de procesos” aplicable al caso ferrocarril.
- Reforzar la duración de las pruebas para disponer de mejores estimaciones sobre costes de mantenimiento y disponibilidad a medio y largo plazo, en especial en el segmento “Heavy Haul”.

- Al igual que para el conjunto de actividades del “portfolio de productos y servicios” del sector gasista, priorizar en el desarrollo de un “pathway” específico que posicione su WTW mediciones reales y/o estimaciones basadas en procedimientos reconocidos a nivel mundial, y evite el nivel de incertidumbre que al respecto se introduce en el debate post COP21 por sus competidores ante la falta de información sectorial específica existente.
- Completar los estudios de seguridad para el caso de fugas en líneas con catenarias de diferentes tensiones y en el interior de túneles.
- Establecer un dinámica de diseminación que desarrolle una “cultura en el uso” de este nuevo combustible y evite los hándicaps que supone el “miedo a los desconocido”.

Renfe ha desarrollado desde 2014 diversas iniciativas de i+D+I en el ámbito de los combustibles alternativos, iniciativas que pretenden completar el “estado del arte” presentado para desarrollar un proyecto de alto impacto en la mejora de la competitividad de sus diferentes segmentos de tracción y sostenibilidad de las líneas de negocios asociadas (secundarias de viajeros y mercancías

La “hoja de ruta” de dicho proyecto contempla los subproyectos siguientes (gráfica 7):



Gráfica 7: Hoja de Ruta Renfe GNL
(Fuente: elaboración propia)

Proyectos de entre los que el más avanzado es el correspondiente con la línea “raiLNG-DMU”, al estar próximo al inicio de las pruebas en vía (Diciembre 2017) tras haberse realizado los estudios de viabilidad técnica y seguridad, procedido a transformar una cabeza tractora de la serie 2600 en los talleres de ARMF en Lleida y encontrarse en la actualidad en proceso de acoplamiento y pruebas en los talleres de Renfe-Métrico de El Berrón (gráfica 8).

Línea de Trabajo: Uso GNL como combustible alternativo segmento viajeros

□ **Proyecto: Transformación DMU diesel serie 2600 en dual (MGNL + MDiesel)**

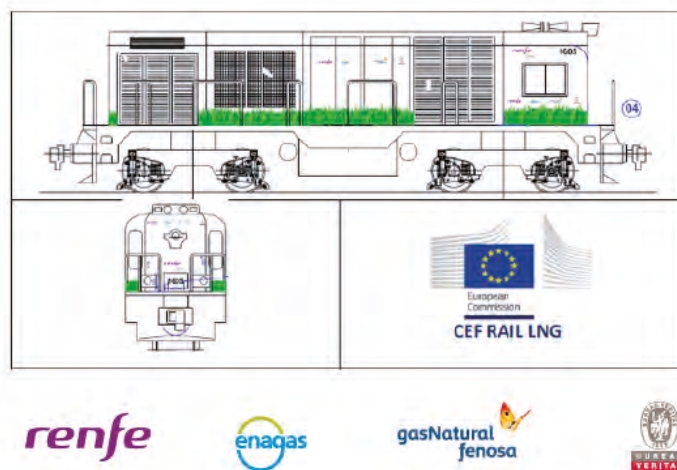
- **Presupuesto:** 1.5 MM €
- **Financiación:** Socios 
- **Situación a la Fecha:**
 - En proceso de terminación transformación unidad en taller.
 - Inicio de pruebas en vía: Diciembre 2017
 - Duración pruebas: 3 meses
- **Beneficios Esperados:**
 - Disposición de información práctica para el desarrollo de los objetivos técnicos, económicos y medioambientales establecidos como necesarios para establecer un proceso de "roll-out" de la tecnología en el segmento de viajeros (cercanías y media distancia).
- **Próximos Pasos:**
 - Desarrollo "subserie dual" para gestión cercanía Caudal/Aller (línea Trubia-Collanzo): en proceso desarrollo ingeniería conceptual del proyecto integral.




Gráfica 8: Detalle proyecto Renfe DMU 2600
(Fuente: elaboración propia)

El estado del resto de proyectos contemplados en la "hoja de ruta" es el siguiente:

- **Línea de Trabajo: Uso GNL como combustible alternativo segmento mercancías/viajeros**
 - Proyecto: Transformación locomotora diesel serie 1600 en MGNL
 - Presupuesto: 4.5 MM €
 - Financiación: 40% Socios / 60% UE (Seleccionado como CEF 2017)
 - Situación a la Fecha:
 - En proceso de coordinación y lanzamiento.
 - Duración del proyecto: 3 años
 - Beneficios Esperados: Disposición de información práctica para el desarrollo de los objetivos técnicos, económicos y medioambientales establecidos como necesarios para establecer un proceso de "roll-out" de la tecnología en el segmento de mercancías.



Gráfica 9: Esquema pintura Locomotora 1600 GNL. (Fuente:Renfe)

- Proyecto: Segmento Shunter (Locomotoras Maniobras en Puertos):
 - Presupuesto: 0.15 MM €
 - Financiación: 50% Socios / 50% UE (incluido en proyecto movilidad marítima Core Lng Hive)
 - Estado: en fase de diseño solución técnica
- Línea de trabajo: Uso GNL como materia prima generación distribuida H2 (Objetivos: transición hacia H2 desde GNL):
 - Presupuesto: 2.5 MM €
 - Financiación: solicitada CEF. No seleccionada en julio 2017
 - Estado: en estudio tecnologías producción distribuida de H2
- Línea de Trabajo: Transporte de GNL por FFCC (Objetivos: desarrollo criterios seguridad para desarrollo corredores inland de la UE):
 - Presupuesto: 0.35 MM €
 - Financiación: Parte se podría obtener del estudio de transporte por ferrocarril del proyecto piloto de Hive (transporte multimodal de ISO contenedor).
 - Estado: en estudio, desarrollo prueba piloto 1er transporte de GNL por FFCC en isocontenedor en la UE a realizar en 2017.

En resumen, una “Hoja de Ruta” con la que Renfe espera no solo convertir a la industria ferroviaria y energética españolas en líderes en la introducción del gas natural como combustible alternativo en el ferrocarril de la Unión Europea, sino disponer de soluciones tecnológicas que a corto plazo le permitan mejorar la competitividad y sostenibilidad de sus servicios y, a medio plazo, ayudar a conseguir los muy exigentes objetivos de reducción de CO2 establecidos por la UE al sector transporte de este país.

Modelado de sistemas de almacenamiento de energía en ferrocarriles

Modeling of energy storage systems in railways

Pablo Minayo Ferreruela¹

Resumen

Este artículo presenta un estudio del comportamiento de diferentes sistemas de almacenamiento de energía embarcados en un tranvía para una ruta real. Se procede a detallar, para dicha ruta, el consumo energético del tranvía, así como la influencia de las diferentes tecnologías en los sistemas de almacenamiento. Para éstos, se profundizará en las tecnologías de las baterías y supercondensadores (que son las más usadas en los proyectos actuales), y se elegirá un sistema de carga por inducción para el sistema de alimentación externo. Finalmente, se concluirán cuáles de los sistemas estudiados pueden servir para el propósito de eliminar la catenaria en todo el recorrido del tranvía y cuáles son las posibilidades para los distintos sistemas de almacenamiento.

Palabras clave: Tranvía, supercondensadores, baterías, catenaria, energía, potencia.

Abstract

This article is focused on the study of the behavior of different on-board energy storage systems in the case of a real track of a tram. It will be detailed, for that track, the energy consumption of the tram, as well as the influence of different technologies in storage systems. Within these technologies, it will be deepened in batteries and supercapacitors as energy storage (which are the most used in nowadays projects), and it will be chosen a wireless inductive charging system. Finally, it will be concluded which of the studied systems are suitable for the purpose of eliminating the catenary in all the track of the tram and the possibilities for these energy storage systems.

Keywords: Tram, supercapacitors, batteries, catenary, energy, power.

¹ Pablo Minayo Ferreruela. Grado en Ingeniería Electromecánica. Máster en Ingeniería Industrial en la Universidad Pontificia de Comillas, ICAI. Actualmente se encuentra estudiando Master in Business Administration, ICADE Business School. Ha hecho prácticas como ingeniero de mantenimiento de material ferroviario en Talgo. Desde 2017, forma parte de la plantilla de la empresa Aecom en el departamento de Sistemas Ferroviarios.

1. Introducción

Actualmente, el creciente consumo de energía por parte de la humanidad, junto con el agotamiento de los recursos fósiles, hacen necesario tanto encontrar nuevas fuentes de energía como aprovechar y hacer un uso más eficiente de ella. El transporte representa un campo muy importante en lo que a consumo de energía se refiere, por lo que es vital utilizar ésta de manera eficiente y tratar de optimizar su uso en este campo. Por otra parte, el hecho de que los medios de transporte ferroviarios dispongan, en el caso de la tracción eléctrica, de una fuente externa de alimentación continua hace que éstos puedan recibir constantemente energía. Por ello en este grupo es más oportuno plantearse reducir el consumo energético, mejorando así la eficiencia del sistema.

Dentro de los medios de transporte ferroviarios, este artículo se centra en el tranvía, modo eminentemente urbano y en clara expansión, con evidentes ventajas respecto al metro ya que su infraestructura no es tan costosa, al poder circular por la superficie.

No obstante, uno de los principales problemas que plantea el tranvía tiene que ver con la contaminación visual, debido al cableado a lo largo de todo su recorrido. Por ello numerosos proyectos actuales han desarrollado tecnologías para intentar eliminar el cable aéreo que alimenta al tranvía, llamado catenaria.

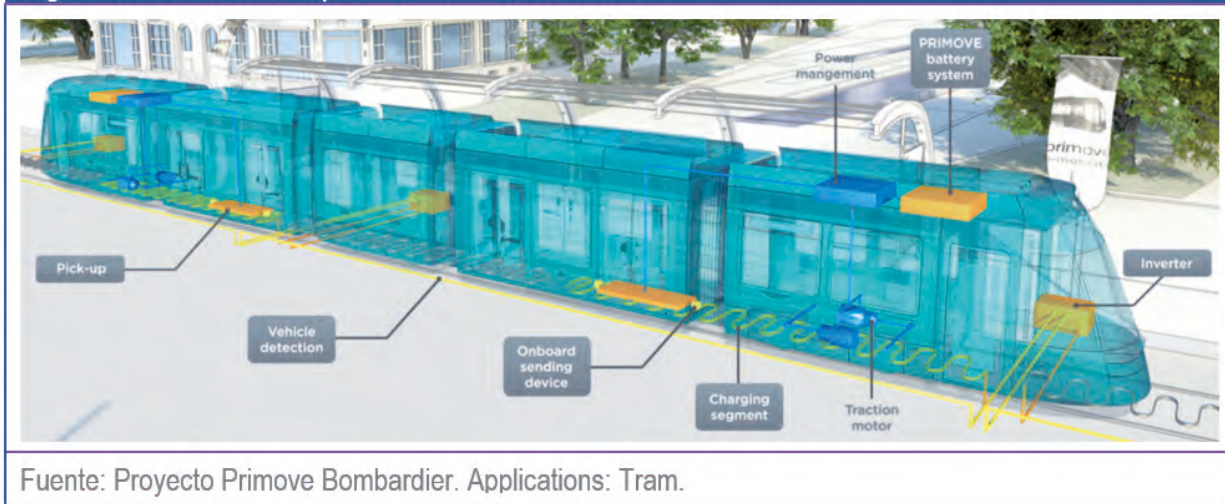
Se elegirá por tanto un sistema de almacenamiento, y, en caso de que fuese necesario, de alimentación, que permita sustituir totalmente a la catenaria. Además, también se abordará, una vez elegido el sistema de almacenamiento, su modelado, dimensionamiento y la verificación teórica de su funcionalidad. Entre los sistemas de almacenamiento capaces de sustituir o complementar al sistema de alimentación externo, las baterías y supercondensadores, en cuanto a tecnologías embarcadas en el tranvía, son las que se han demostrado más eficaces, como se concluye en los numerosos proyectos que actualmente los están investigando.

Las baterías son los acumuladores de energía tradicionales y los más usados en la actualidad, dadas las buenas prestaciones de almacenamiento que se han alcanzado gracias a un constante estudio y desarrollo de sus características. La alta densidad de energía y el bajo coste hacen que sean una solución usada actualmente para los tranvías. El inconveniente principal de las baterías es la baja densidad de potencia que poseen junto con su baja durabilidad, dado que, al soportar reacciones químicas en su interior, se deterioran de una manera rápida.

Los supercondensadores, también llamados ultracondensadores, son, en el momento actual, la novedad en lo que a almacenamiento de energía se refiere. El tipo de supercondensador más común hoy en día es el condensador electroquímico de doble capa (EDLC). Su modo de funcionamiento le permite trabajar sin reacciones químicas parasitarias en su interior, siendo el almacenamiento de carga puramente electrostático, lo que permite aumentar considerablemente su vida útil, una de las ventajas más importantes frente a las baterías. Su característica fundamental reside en la elevada densidad de potencia que poseen, lo cual hace que sean idóneos para los tranvías, ya que necesitan que en periodos cortos de tiempo se transmitan cantidades de potencia elevadas.

Para el sistema de alimentación externa se ha elegido el de carga por inducción o transmisión de energía inductiva de alta potencia por aire, un sistema enterrado en el suelo que permite reducir todo el impacto visual que la catenaria implica. Este sistema se caracteriza por la transmisión de energía a través del aire, por lo que no existe superficie de contacto entre tranvía y vía. Esto supone una de las ventajas principales de este sistema, ya que no se produce rozamiento entre superficies dado que el contacto es nulo, por lo que el mantenimiento es menor que en otras tecnologías sustitutivas de la catenaria. En la Figura 1 se puede observar el esquema completo de este sistema incluyendo al propio tranvía. El tranvía lleva incorporados unos sensores que detectan cuándo está en una zona de carga, activando las bobinas receptoras y disponiendo al tranvía para su alimentación.

Figura 1. Sistema completo Bombardier Primove



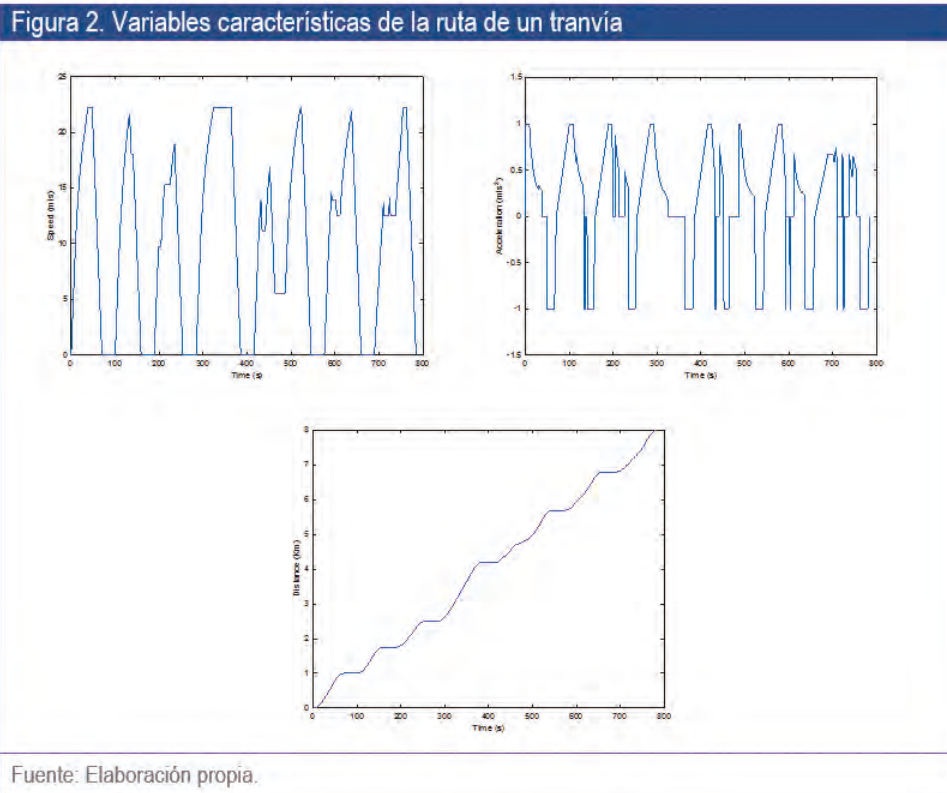
No obstante, se ha intentado desarrollar un sistema embarcado que permita minimizar la presencia del sistema de alimentación externo: debido a las ventajas de los supercondensadores y baterías, se ha considerado que éstos, de manera individual o combinada, pueden ser una solución interesante para ello, consiguiendo además hacer un uso más eficiente de la energía.

2. Metodología

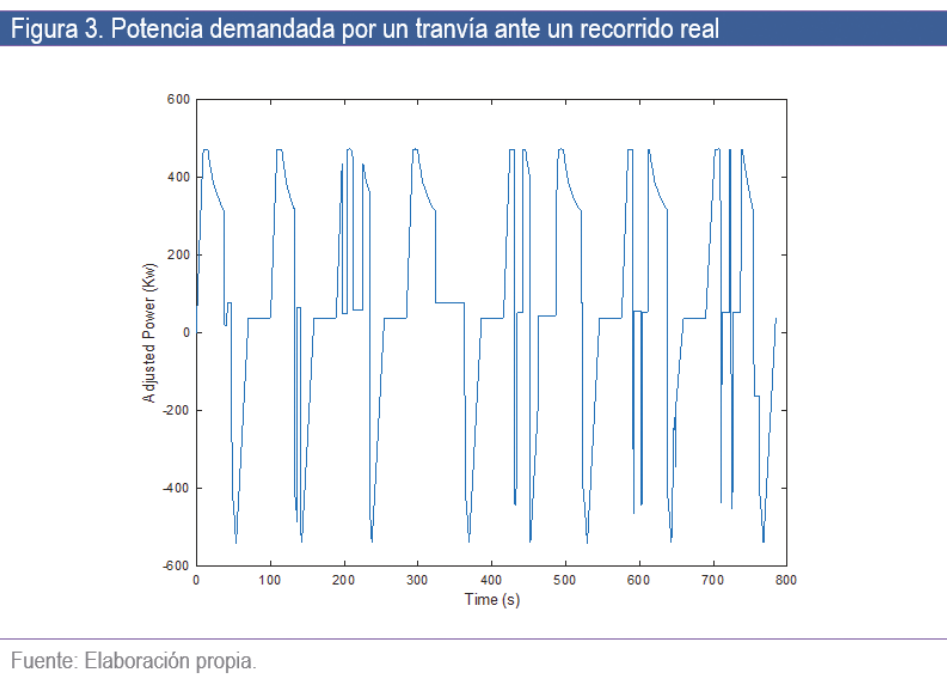
Para dimensionar el sistema de almacenamiento que debe ir embarcado en el tranvía, se ha establecido una estrategia que permita recuperar toda la energía generada en el frenado. Una vez que se ha dimensionado, se ha comprobado que dicha energía era recuperada totalmente; no obstante, el sistema de almacenamiento no era capaz de alimentar al tranvía en todo su recorrido o al menos en su mayor parte. Como lo que se pretende es reducir la energía entregada por el sistema de alimentación externo, se ha probado de manera experimental un sistema de almacenamiento que permita tal cosa, siempre que no se superen los límites de masa y dimensiones máximas aceptadas por el tranvía.

Por lo tanto, es necesario definir y diseñar qué sistemas y configuraciones pueden servir para tal meta y comprobar si, ante una situación real, éstos pueden responder de la manera deseada. Una vez que se haya diseñado el sistema de almacenamiento, se establecerá su estrategia de funcionamiento en tres modos distintos. Después de haber definido el modo de actuación, para poder testar el comportamiento del sistema de almacenamiento, se diseñará un recorrido teórico, con sus variables características (tiempo, velocidad y aceleración) para un tranvía estándar. Con ello, se calcularán los datos de entrada para poder analizar el comportamiento de los distintos sistemas de almacenamiento. Cuando el sistema de almacenamiento se ajuste al comportamiento requerido, se probará en la ruta real de un tranvía, con más paradas intermedias, para poder dar un carácter práctico y exigir al sistema de manera realista la potencia demandada por un tranvía.

En las siguientes figuras se pueden observar las variables características del recorrido real usado en las simulaciones. Las gráficas de velocidad, aceleración y distancia, como se puede observar en la Figura 2 (en cuyos respectivos ejes de ordenadas se muestran estas variables, y en los de abscisas el tiempo en segundos), son para un recorrido con 7 paradas intermedias de unos 30 segundos por parada. La duración total del recorrido es de alrededor de 13 minutos y la distancia cubierta de 8 kilómetros.



En la Figura 3 se puede observar la potencia demandada por el tranvía para las gráficas mostradas anteriormente. Se puede observar cómo la potencia nunca se mantiene constante en 0 MW, a pesar de las paradas que tiene el tranvía. Esto se debe al consumo de los equipos auxiliares, que, aun estando éste parado, siguen consumiendo energía.



En cuanto al sistema de almacenamiento, como se ha indicado, se establecerán tres modos de funcionamiento: el modo estándar se basará en entregar la potencia demandada por el tranvía en cada momento; el modo impulso en entregar una potencia constante, devolviendo en ciertos tramos potencia a la red, requiriendo por lo tanto de un sistema de alimentación externa continuo; y el modo CFO (catenary free operation) en entregar la potencia demandada por el tranvía sin cargar en las estaciones, sólo cargando en tramos de deceleración. En todos los modos se dispone de frenado regenerativo, a través del cual se cargará el sistema de almacenamiento en las fases de aceleración negativa.

Los valores característicos y dimensiones tanto del tranvía como del sistema de almacenamiento para las distintas tecnologías se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables características del sistema simulado

Variable	Valor	Unidades
Variables genéricas		
Masa tranvía	51980	kg
Eficiencia del sistema de tracción	0.9	-
Eficiencia del convertidor DC-DC	0.95	-
Superficie frontal del tranvía	8.3	m ²
Densidad del aire	1.225	kg / m ³
Coefficiente de arrastre	0.82	-
Variables caso sólo supercondensadores		
Capacidad interna supercondensadores	189	F
Resistencia interna supercondensadores	0.0006	Ω
Masa supercondensadores	3043.2	kg
Tensión nominal supercondensadores	500	V
Eficiencia de carga	0.95	-
Potencia máxima de carga	900	kW
Variables caso sólo baterías		
Masa baterías	3000	kg
Contenido de energía máxima	147	kWh
Corriente máxima de descarga por unidad	120	A
Tensión nominal	532	V
Eficiencia de carga	0.9	-
Potencia total máxima de carga	383.04	kW
Variables caso mixto		
Masa baterías	1000	kg
Contenido de energía máxima baterías	49	kWh
Corriente máxima de descarga por batería	120	A
Tensión nominal de las baterías	532	V
Eficiencia de carga de las baterías	0.9	-
Potencia total máxima de carga de las baterías	120	kW
Capacidad interna supercondensadores	126	F
Resistencia interna supercondensadores	0.0009	Ω
Masa supercondensadores	2028.8	kg
Tensión nominal supercondensadores	500	V
Eficiencia de carga	0.95	-
Potencia máxima de carga	900	kW

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que el límite operativo inferior de los distintos sistemas de almacenamiento se fijó en distintos valores, según las características de las tecnologías. Así, en el caso de los supercondensadores se fijó que operasen de manera correcta entre un estado de carga del 100% y del 16%. En el caso de las baterías, este rango es menor dadas las características técnicas de éstas, siendo éste de entre el 100% y el 40%.

3. Resultados

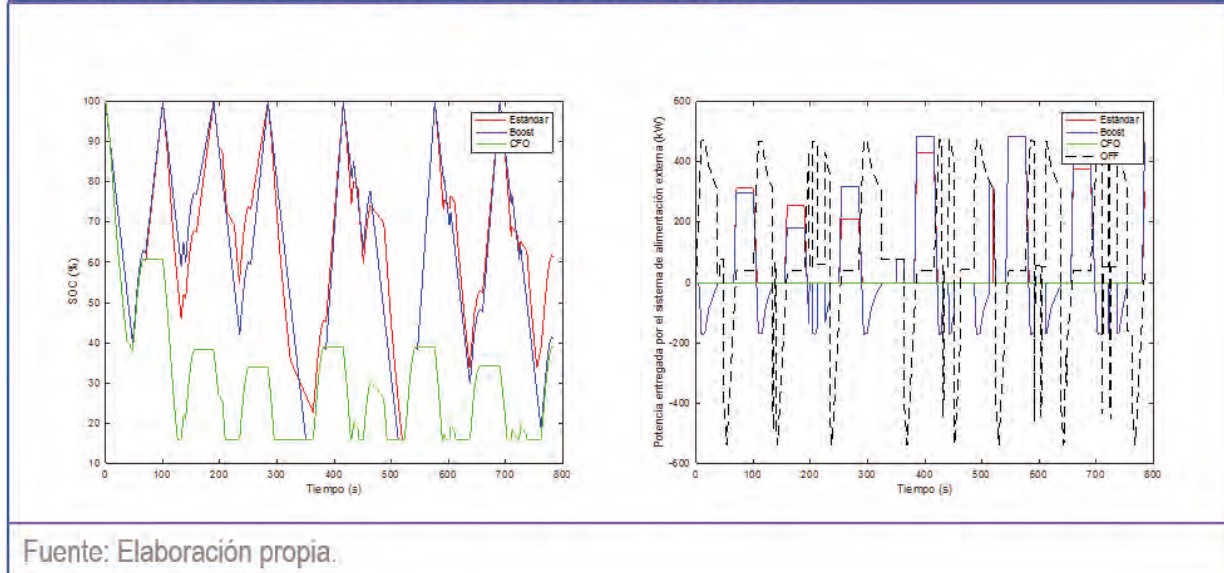
En esta sección, para no alargar demasiado este Artículo, no se muestran todas las configuraciones y recorridos (teóricos y reales) que se desarrollaron en el proyecto; se recogen varias configuraciones del sistema de almacenamiento y sólo los datos correspondientes a los recorridos reales. A su vez, en el proyecto, y dados los limitados resultados que se obtuvieron en el recorrido teórico para el caso de un sistema de almacenamiento formado exclusivamente por baterías, no se trabajó con el recorrido real.

Para todas las figuras de este apartado se ha usado la notación de N y M para especificar el número de unidades en serie y en paralelo del sistema de almacenamiento. En caso de que se trate del sistema mixto, es decir, supercondensadores y baterías a la vez, N y M se aplica a los supercondensadores y NN y MM a las baterías.

En la parte izquierda de la Figura 4 se muestra el estado de carga (SOC: state of charge) del sistema formado por supercondensadores para el caso del trayecto real del tranvía. Se puede observar cómo para los modos estándar e impulso (boost en la figura) el sistema se comporta según lo requerido, sólo llegando a niveles de mínima energía en dos momentos puntuales, recuperándose al poco tiempo. No se puede decir lo mismo del modo CFO, pues no llega a suministrar la potencia requerida por el tranvía al llegar constantemente a niveles de mínima energía, alcanzando el nivel de carga en este modo continuamente valores mínimos (16%) entre paradas, haciendo imposible su funcionamiento independiente. Esto implica que el tranvía necesita por lo menos carga en la estación y que no puede eliminarse la alimentación externa en todo el recorrido. A la vez, resulta esperanzador ver que sólo con la potencia de carga en las estaciones, el sistema en los modos impulso y estándar puede responder perfectamente y no necesitar de alimentación externa en casi todo su recorrido.

En la parte derecha de la Figura 4 se puede observar la potencia entregada por el sistema de alimentación externa para esta simulación. En el modo estándar sólo es distinta de 0 en los tiempos de parada en las estaciones durante todo el recorrido, así como alrededor de los 520 segundos de la simulación, tiempo en el que el sistema de almacenamiento llega a su nivel de energía mínima y por lo tanto necesita ayuda adicional del sistema de carga por inducción. El modo impulso se comporta de manera distinta, pues al entregar una potencia más alta que la requerida por el tranvía en ciertos tramos, el sistema de almacenamiento devuelve potencia a la red que puede ser aprovechada por otros tranvías o incluso almacenada para su uso posterior. Al igual que ocurre con el modo estándar, en un tiempo de 510 segundos aproximadamente, el sistema de almacenamiento llega a su energía mínima por lo que requiere igualmente potencia del sistema de alimentación externa. En el modo CFO, la potencia entregada por el sistema de carga por inducción es 0 en todo su recorrido, al no haber tal sistema, mostrando que sólo con supercondensadores el tranvía, en este modo, no puede funcionar correctamente. Por último, en la gráfica de la derecha, el modo Off muestra la potencia entregada por la alimentación externa en el caso de no contar con ningún tipo de sistema de almacenamiento. Con ello se puede observar de manera clara el ahorro de potencia a entregar al contar con esta tecnología.

Figura 4. Estado de carga del sistema de supercondensadores y potencia entregada por el sistema de alimentación externa. Caso real: N=4, M=12

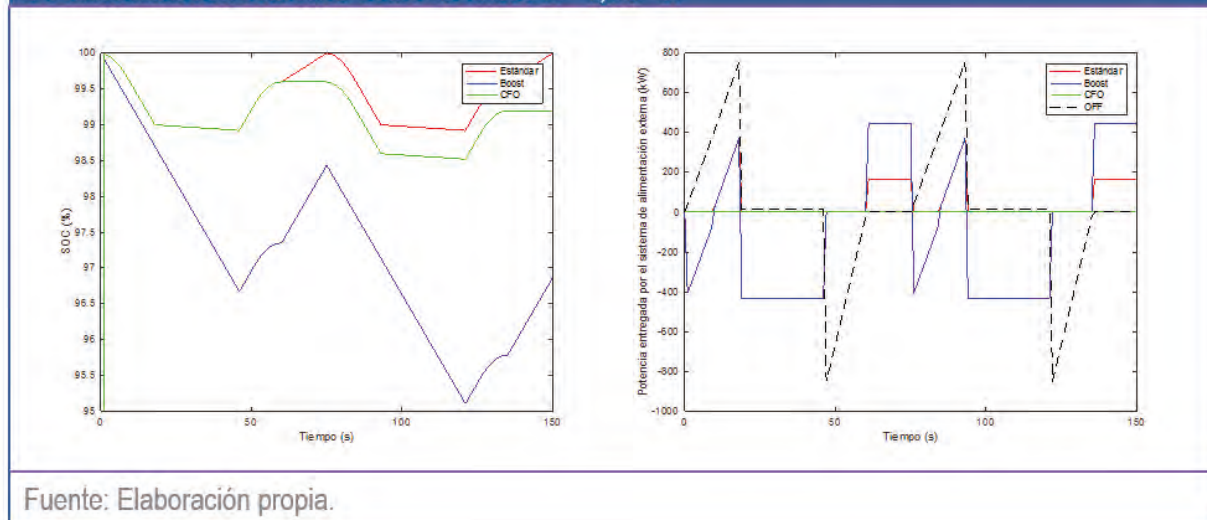


En el caso de las baterías, en la parte izquierda de la Figura 5 se puede observar su estado de carga para la ruta teórica. Éste no llega a bajar del 95% en ninguno de los modos, por lo que queda comprobado que hay energía disponible para alimentar al tranvía en todo su recorrido. También es interesante apreciar cómo en el modo impulso las baterías no llegan a cargarse hasta su punto de energía máxima después de cada parada, pues sólo alcanzan un 98.5% del estado de carga máximo debido a la limitación de potencia de carga existente. A pesar de ello, la limitación de la potencia que existe en el modo de las baterías, más restrictiva que en el modo de los supercondensadores, hace que el sistema de alimentación externa deba complementar a las baterías en gran parte del recorrido, tal y como se muestra en la parte derecha de la Figura 5. Este, el principal problema de las baterías, que no pueden entregar la potencia necesaria, llegando al límite demasiado pronto y no pudiendo alimentar por sí solas al tranvía durante todo su recorrido.

Como se ha mencionado, en la parte derecha de la Figura 5 se muestra la potencia entregada por el sistema de alimentación externo para el caso de las baterías. Se puede observar cómo en el modo estándar y en el modo impulso la potencia máxima a entregar por el sistema de alimentación externa se reduce de casi 800 kW a menos de la mitad, lo cual supone un ahorro en potencia instalada del sistema de alimentación externo.

En el modo impulso la potencia entregada por el sistema de almacenamiento al sistema de alimentación externo es considerablemente alta en parte del recorrido, la cual puede ser aprovechada por otros tranvías que se encuentren en fase de aceleración.

Figura 5. Estado de carga del sistema de baterías y potencia entregada por el sistema de alimentación externa. Caso teórico: N=1, M=6.



Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se ha visto en la Figura 5, el sistema de almacenamiento formado por baterías no es suficiente por sí solo para dar la potencia requerida por el tranvía en todo su recorrido. En este caso carece de sentido probar el sistema en la ruta real, puesto que no es capaz de satisfacer la potencia del tranvía en el recorrido teórico, por lo que se puede concluir que este sistema no es apto por sí solo para sustituir a un sistema de almacenamiento externo. No obstante, las baterías pueden ser un sistema de almacenamiento complementario al sistema de alimentación externa, permitiendo reducir el dimensionamiento de éste en cuanto a potencia.

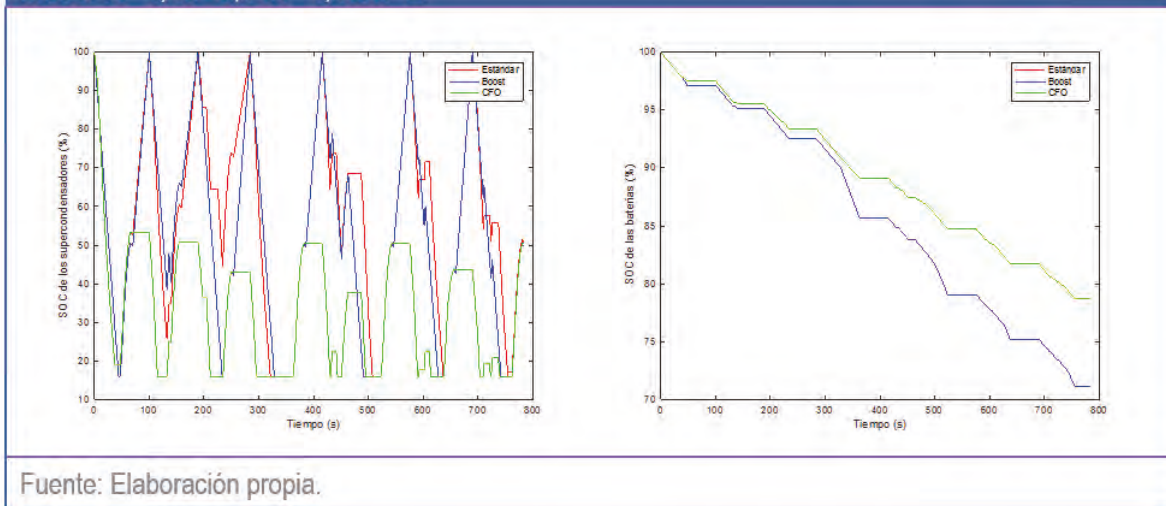
Una vez que se ha observado el comportamiento de los supercondensadores y de las baterías individualmente, parece que las debilidades de un sistema son las fortalezas del otro. Por lo tanto, se ha diseñado un sistema que cuente con las dos tecnologías: supercondensadores para poder satisfacer los picos de potencia del consumo del tranvía y baterías como fuente de energía base, para cantidades limitadas de potencia.

En la parte izquierda de la Figura 6, que se refiere a este sistema mixto, se puede observar el estado de carga del sistema de supercondensadores. En los modos impulso y CFO éste llega a su valor mínimo constantemente, por lo que su comportamiento no es óptimo. En comparación con el caso de sólo supercondensadores, éstos se comportan mejor que cuando están combinados con baterías. Debido a la aplicación, en este caso, tranvías, la potencia demandada es alta para ser suplida sólo con baterías, y los supercondensadores por sí solos pueden entregar la energía necesaria durante casi todo el recorrido, como ya se observó en la Figura 4. En este caso, el elevado peso de las baterías hace que se reduzca el número de supercondensadores posibles a instalar debido a las restricciones de masa, reduciéndose también la energía que éstos últimos pueden almacenar. Por ello, tal y como se observa, el estado de carga de los supercondensadores en ciertas partes del recorrido llega a su valor mínimo. De todas formas, hay que destacar el comportamiento del sistema de almacenamiento en el modo estándar, ya que los supercondensadores no llegan constantemente al nivel de mínima energía tal y como pasa en los otros modos.

Para las baterías, se puede observar en la parte derecha de la Figura 6 su comportamiento. En los casos estándar y CFO, el comportamiento de las baterías es similar ya que darán 100 kW en

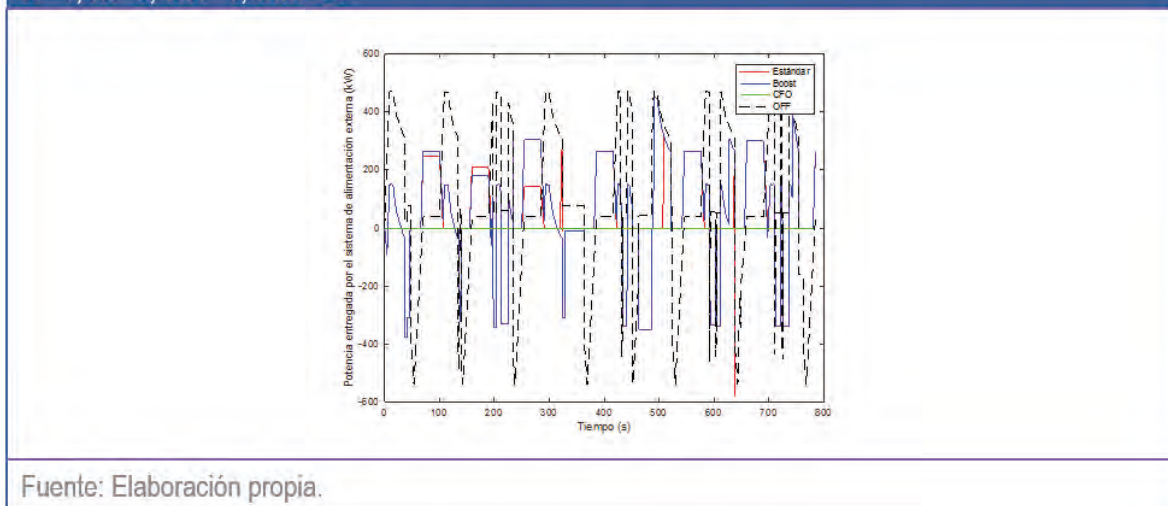
caso de que la potencia demandada por del tranvía sea mayor. Cuando la potencia demandada por el tranvía es menor a ese valor, las baterías se encargarán de suministrar al tranvía toda la energía necesaria. En el modo impulso el comportamiento es diferente: el sistema de baterías dará una potencia constante de 100 kW en las fases de aceleración y velocidad constante. Por ello, en ciertos tramos donde la potencia demandada por el tranvía es menor, el sistema de baterías suministra siempre 100 kW, devolviendo parte a la red. Por ello, la descarga de las baterías en este modo es mayor, como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6. Estado de carga del sistema de supercondensadores y baterías. Caso real: Mixto. N=4, M=8, NN=1, MM=2.



Por último, en la Figura 7 se observa la potencia entregada por el sistema de alimentación externa. En el modo impulso la potencia negativa muestra que el sistema de almacenamiento entrega una buena parte del tiempo potencia al sistema de alimentación externa. Así mismo se observa cómo la potencia de carga en el modo estándar no es tan alta como en el modo impulso, ya que los supercondensadores no llegan a descargarse tanto, siendo en esta simulación más parecidas.

Figura 7. Potencia entregada por el sistema de alimentación externa. Caso real: Mixto. N=4, M=8, NN=1, MM=2.



4. Conclusiones

En cuanto a los tres modos definidos, el estándar es el que mejor se comporta con relación a los objetivos de suministrar energía al tranvía durante todo su recorrido, minimizando la presencia del sistema de alimentación externa. La principal desventaja del modo impulso es que, a pesar de entregar potencia aun cuando el tranvía no la necesita y se pueda devolver a la red para otros tranvías, el sistema de almacenamiento se descarga por lo general muy rápido llegando a su límite de energía mínimo, comprometiendo el objetivo de alimentar al tranvía en todo su recorrido. Respecto al modo CFO, ha quedado claro que hoy en día no existe tecnología que, sin poder cargarse en las paradas, pueda suministrar energía al tranvía durante todo su recorrido sólo con la carga en el frenado, puesto que el sistema de almacenamiento llega su límite inferior de energía constantemente no pudiendo ser una fuente de alimentación continua.

Respecto a las dos tecnologías de almacenamiento estudiadas, cabe destacar el mejor comportamiento de los supercondensadores frente a las baterías. El alto nivel de potencia que los primeros pueden entregar en una aplicación donde esos valores se requieren, como es el caso de los tranvías, es la clave de su ventaja. La única pega que tienen los supercondensadores reside en la baja energía que pueden entregar, puesto que se llega a límites de energía mínima en alguna ocasión cuando se someten al trayecto real del tranvía. Pese a esto, los supercondensadores presentan un comportamiento aceptable y un buen compromiso entre peso, potencia y energía, por lo que, en términos del objetivo del proyecto, es decir, alimentar al tranvía en la totalidad o mayor parte de su recorrido, presentan un comportamiento superior al caso de las baterías o al caso de la combinación entre las dos tecnologías.

En cuanto a las baterías, su alto peso y su baja densidad de potencia hacen que no puedan sustituir a la catenaria en todo ni en la mayor parte del recorrido. No obstante, sí que pueden ser un complemento para sistemas auxiliares que requieran una cantidad de potencia no muy alto, dada su alta capacidad energética. Otra opción puede ser la de usar baterías como sistema de alimentación complementario al tranvía, junto con el sistema de alimentación externo, permitiendo reducir la potencia de dimensionamiento de éste.

Por último, el caso mixto, que cuenta con las dos tecnologías, no funciona tampoco según lo requerido, o por lo menos no tan bien como lo hacen los supercondensadores individualmente. La elevada masa de las baterías hace que la potencia que puede entregar el sistema de almacenamiento se vea reducida debido a la reducción a su vez de supercondensadores a instalar, no pudiendo ser esa potencia en el caso de las baterías y energía en el caso de los supercondensadores suficientes para satisfacer la demanda del tranvía.

Por lo tanto, se puede concluir que, en esta aplicación, el modo estándar y los supercondensadores han resultado ser la combinación óptima como sistema alternativo a la catenaria. Las baterías o un sistema mixto pueden intentar reducir la potencia instalada en el sistema de alimentación externo, pero en ningún caso pueden aspirar a sustituir a éste.

En cuanto a las posibilidades de desarrollo futuras de este campo, es decir, de los sistemas de almacenamiento, tienen que ver con la mejora de las prestaciones de los actuales. La utilización de nuevos materiales, así como la mejora de la eficiencia de los citados sistemas, puede llevar a un mejor desempeño de éstos. Ello se debe traducir también en relajar uno de los límites más restrictivos actualmente: su masa. La posibilidad de contar con sistemas de una masa menor puede suponer una mejora en los niveles de potencia y energía, al poder instalar más unidades de almacenamiento en el tranvía. Por ello numerosos proyectos que cuentan con estas tecnologías siguen tratando de optimizar todavía más el funcionamiento de supercondensadores y baterías.

5. Bibliografía

- Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Sitio Web: <http://www.idae.es/index.php> (visitada 07 septiembre 2016).
- García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. d. (2008). Cuantificación del consumo de energía eléctrica en el ferrocarril español. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid: Monografías ElecRail.
- Stanley, M. (2012). History, Evolution and Future Status of Energy Storage. Proceedings of the IEEE, 100: 1518 - 1534.
- Rodríguez, A. (2009). Tranvía sin catenaria desarrollado por CAF y basado en el empleo de ultracondensadores. Vía Libre.
- Factron S.A. SuperCap: Condensadores de doble capa y módulos con capacidades hasta 12.000 Faradios de WIMA. REE. Jun. 2011.

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 2018
número 12

Estudio de eficiencia energética, sobre la reducción de temperatura, en instalaciones, tratadas con pintura de recubrimiento reflectante

Políticas Públicas en los Ferrocarriles: La Red Ferroviaria de la Región del Duero

Análisis de las oportunidades medioambientales y económicas de la electrificación de una línea ferroviaria

El GNL, un combustible alternativo para un ferrocarril aún más sostenible

Modelado de sistemas de almacenamiento de energía en ferrocarriles



FUNDACIÓN DE LOS
FERROCARRILES
ESPAÑOLES