

El GNL, un combustible alternativo para un ferrocarril más sostenible

Claudio Rodríguez Suárez

Director General de Infraestructuras de Enagás Transporte S.A.U.

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 de 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 (gCO_2/tKm vs gCO_2/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 diésel, 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 (figura 1, página siguiente).

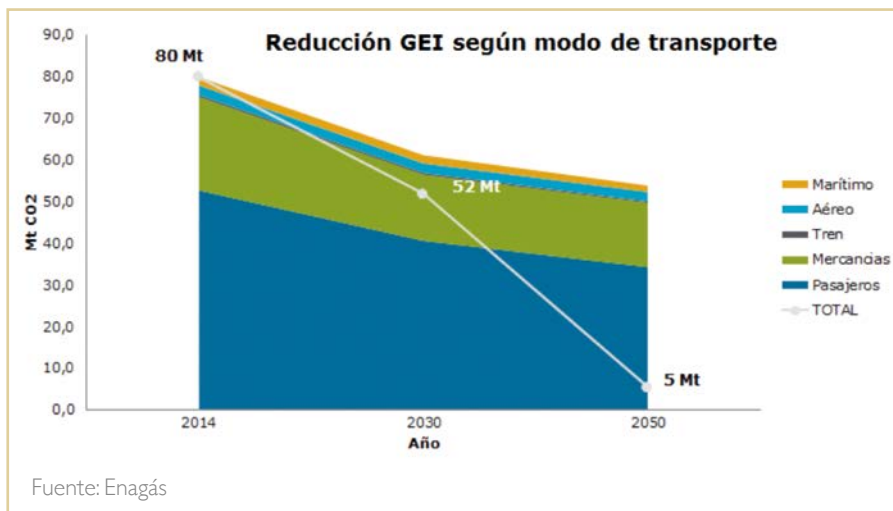
Una "Hoja de Ruta" para la descarbonización del sector ferroviario

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 mas 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.

Figura 1. Tendencia de emisiones frente a compromisos sectoriales de reducción



¿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:

- 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 para 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”

Desde el punto de vista “cuantitativo”:

- Reducir las emisiones:

g/p _{Km} o g/t _{Km}	2030	2050
CO₂	-50% (*)	-75% (*)
Consumo	-50% (*)	-60% (*)
NOx + PM	-40% (*)	-100% (*)
Noise and Vibraciones	Reduce	Reduce

(*) respecto a 1990

- o 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).
- 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.

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%

- La mejora en la tracción diésel:
 - 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 IIIB	¿IIIB 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 ó electrificados ó donde progresivamente se van introduciendo locomotoras bimodales y en menor grado, por su elevado importe, loco-

motoras “tritensión”. Como ejemplo del “apalancamiento” del parque, en la UE, el 95% del parque con motorización previa a IIIB (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 IIIB (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 ó 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.

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:

- 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 ó 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.

- 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 diésel 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 diésel 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-IIIA.

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 un 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.

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 (figura 2) que las acciones sobre el empleo de un binomio motor-combustible más sostenible son las que a priori presentan un mayor impacto potencial.

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 de 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 biocombustibles, 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

Figura 2. Medidas Eficiencia con mayor impacto en el FFCC



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 su 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 aplicables a todos los segmentos ferroviarios (de DMU a Heavy Haul). No se consideran 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 ó, de adaptarse de forma competitiva a vehículos existentes, ó 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 repos-

taje 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 *"Weel 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...

Análisis de Alternativas

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

- Seguridad del suministro:
La seguridad de suministro de un combustible depende de varios factores, siendo los principales a los efectos del

presenta 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 ó 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) ó 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 (Figura 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 ó nuevos "añadidos" a la cadena logística ó en el caso de que dichos "estados" no sean tecnológicamente alcanzables de foma 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 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 lide-

ra 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 la 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 (Figura 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.

Figura 3. Capacidad y logísticas alternativas de las infraestructuras europeas de GNL



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).

- 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 ó 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 dedicados 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 ó a cambios regulatorios de tipo medioambiental como ocurrió tras la crisis del petróleo de los 70’s ó 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, ó 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 que 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.

- 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.

- **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 cos-

tes 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 ó bien equivalentes ó 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:

Diésel	GLP	GNL	GNC	H ₂ -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.

- **Precio:**
Desde el punto de vista de precio de la materia prima el gas natural presenta:
 - El precio más competitivo (*):

Diésel	H ₂ -gas	GLP	GNL
1,32	1,16 (-13%)	0,71 (-46%)	0,64 (-52%)

(*) €/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). (en página siguiente)
- Así como incluso unos márgenes que permitirían la introducción de mezclas con combustibles menos competitivos desde el punto de vista del 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%.

- **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

BC-1: Análisis rentabilidad transformación segmento viajeros

Business Case DMU´s:

Parque a transformar:
 □ 4 DMU´s serie 2600
 □ Longitud línea: 50 Km



	100% GNL	DIESEL IIIB	Electrificación
Capex Unidades	1,10 MM € (1)	0,45 MM €	16,0 MM € (2)
Capex Infraest.	1,5 MM € (3)	0 MM €	15,0 MM € (4)
Opex (5)	8,0 MM €	14,5 MM €	4,5 MM €
ROI (6)	2 - 6 años		> 60 años

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)

BC-2: Análisis rentabilidad transformación segmento mercancías

Business Case Heavy Haul:

Parque a transformar:
 □ 2 Locomotoras serie 1600



	100% GNL	DIESEL IIIB	Electrificación
Capex Unidades	1,5 MM € (1)	1,1 MM €	13,0 MM € (2)
Capex Infraest.	1,5 MM € (3)	0 MM €	0 MM € (4)
Opex (5)	9,5 MM €	15,0 MM €	8,0 MM €
ROI (6)	2 - 6 años		> 130 años

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)

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 ó 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 veri-

ficación de su integridad a los efectos de minimizar el riesgo de fugas.

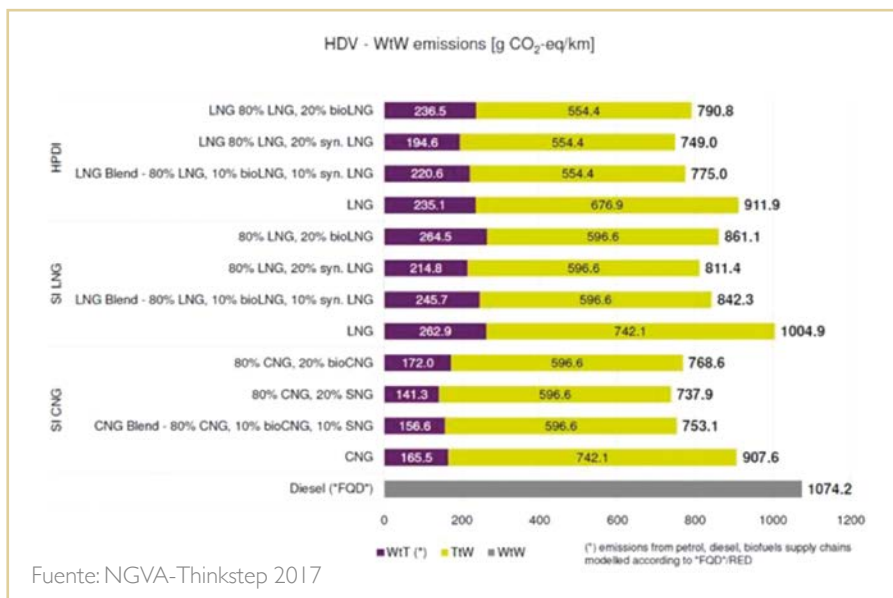
- Los sistemas que emplean hidrógeno si bien eliminan las partes móviles conllevan mayores costes de mantenimiento al requerir tanto la sustitución del regenerador con una frecuencia dependiente de la tecnología empleada y un coste equivalente al 50% de la inversión inicial de la propia célula, como 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 vida 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.

- 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% (Figura 4, página siguiente) 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.

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

Figura 4. Análisis WTW comparativo CNG/LNG vs Diesel



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 (Figura 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.

Figura 5. Resumen competitividad comparativa entre combustibles alternativos

	GLP	GN	BIO	H ₂
Seg. Suministro	■	■	■	■
Precio	■	■	■	■
Capex	■	■	■	■
Eficiencia Uso	■	■	■	■
Emisiones	■	■	■	■
Madurez Tec.	■	■	■	■
Seguridad Uso	■	■	■	■
Hibridabilidad	■	■	■	■

- entre 0 y 2
- entre 3 y 4
- entre 5 y 6
- entre 7 y 8
- entre 9 y 10

Fuente: Enagás

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

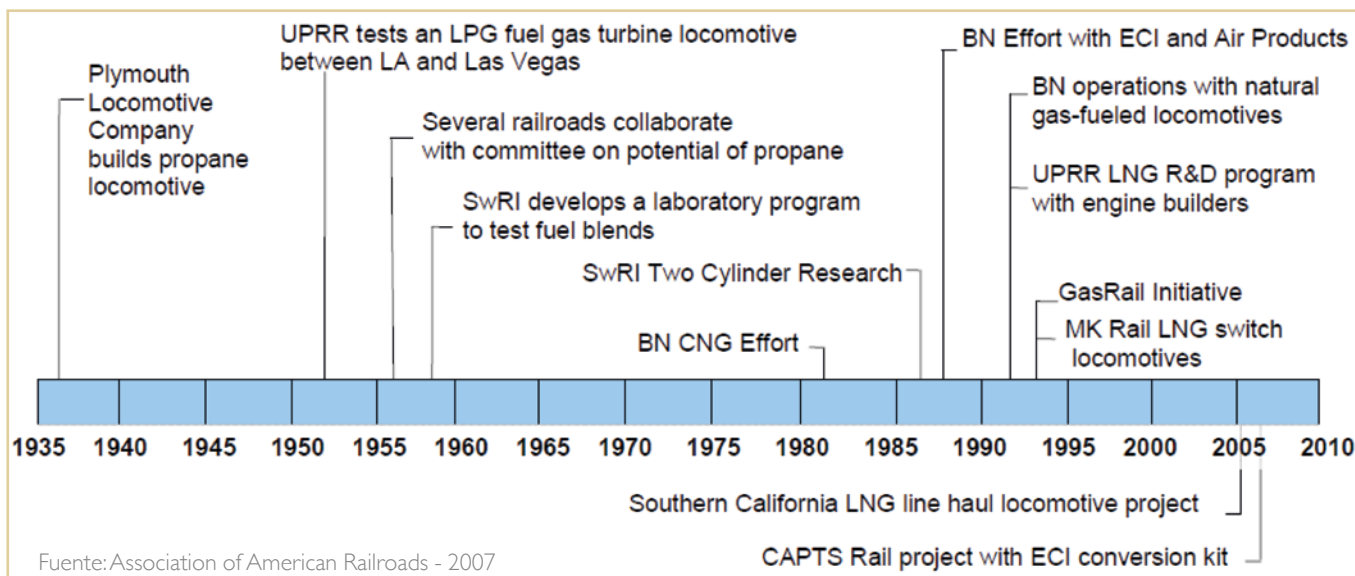
En la actualidad se puede considerar que, con más de 20 MM de Vehículos en servicio, tanto la logística como la tecnología de uso del gas natural como combustible para motores alternativos en potencias de hasta 400 hp se encuentra madura, y resulta especialmente competitiva en flotas de servicios punto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

En otros segmentos, como el marítimo ó 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 "gasta" 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

Figura 6. Histórico de experiencias uso gas como combustible en el FFCC



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 (Figura 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.

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

Fotografía 1: Locomotora experimental a propano (1936 - 1980)



Fuente: Museo de Transporte de Kirkwood

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 apro-

vechaba 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, 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 atendiendo las necesidades de los campos de gas e instalaciones de licuefacción de la península de Yamal.

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 sí 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 desa-

Fotografía 2: Locomotora experimental Union Pacific



Fuente: Association of American Railroads - 2007

rollo 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 ó 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) ó retomar el cambio de tracción, lo que en cualquier caso suponía mayores costes.

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

En este período, se reactivan las pruebas y amplía 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%

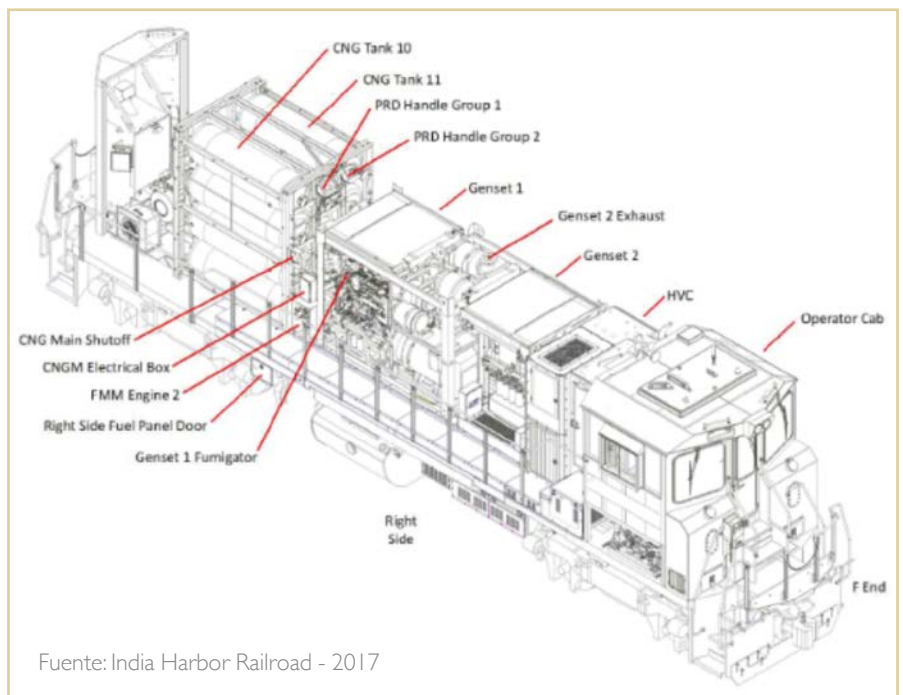
En la misma la reglamentación de emisiones de referencia fue la Tier 4, y en la misma se llevaron a cabo las siguientes pruebas por segmento y tipo de combustible:

- 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 meta-no:** 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 NOx y PM, precisamente donde más exigentes resultan las evoluciones normativas aplicables (Tier IV implica reducir, frente a TIER III, un 76% los NOx 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 CO_{2e} 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 al-

canzable 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

Fotografía 3. Desarrollo de pruebas en vía locomotoras duales GNL del Florida East Coast Railroad



Fuente: Chart Industries- 2017

“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.

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 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

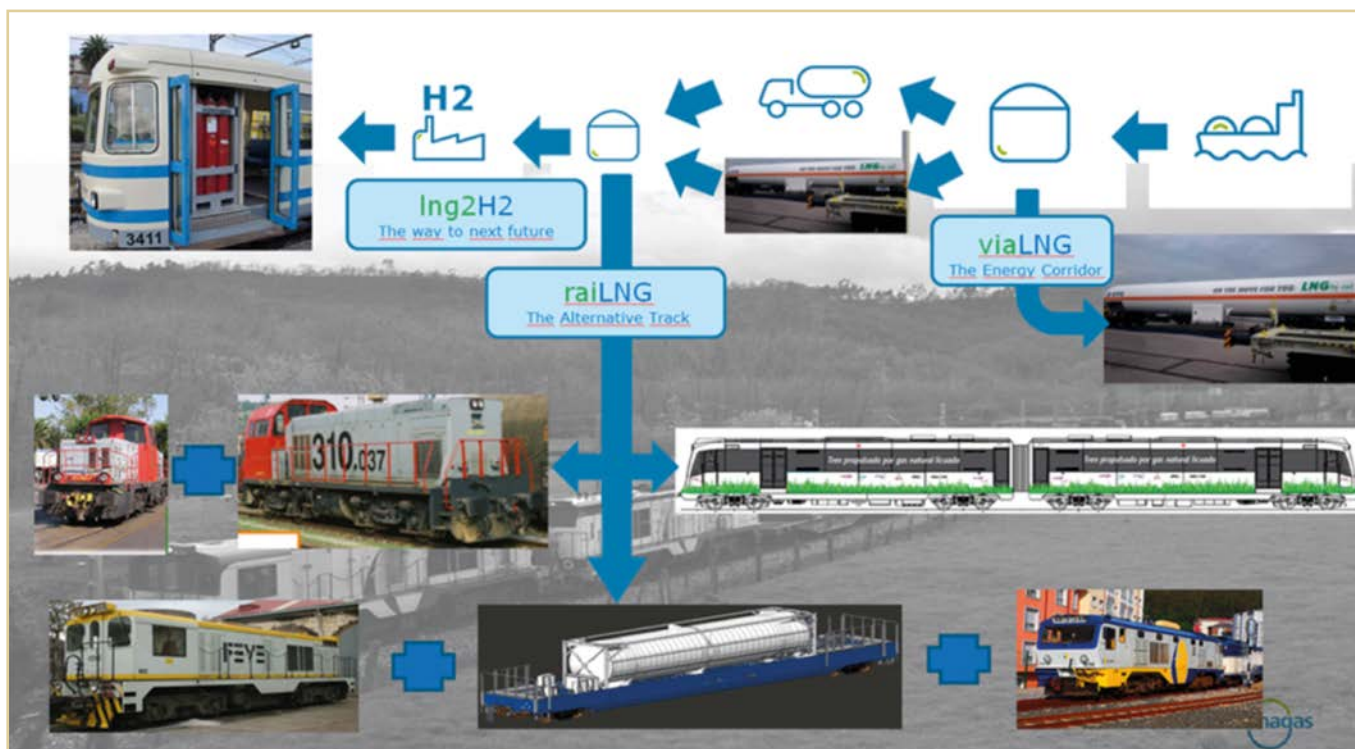
exigentes (incluso para las soluciones basadas en electrificación, fundamentalmente por el gran impacto del factor de utilización) y por tanto el mejor escenario para demostrar la competitividad de soluciones alternativas:

- 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 lo desconocido”.

Renfe ha desarrollado desde 2014 diversas iniciativas de i+D+i en el ámbito de los combustibles alternativos, iniciativas que

Figura 7. Hoja de Ruta Renfe GNL



Fuente: elaboración propia

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 (Figura 7):

Proyectos de entre los que el más avanzado es el correspondiente con la línea “raiLNG-DMU” (Figura 8), un proyecto que, tras el desarrollo de los correspondientes estudios de viabilidad técnica y económica (Instituto Cerdá) y seguridad (Bureau Veritas y Qualiconsult), fue inaugurado de forma oficial el pasado día 8 de enero, convirtiéndose de esta forma en el primero a nivel mundial primero en utilizar GNL en el segmento DMU (Fotografía 4).

Fotografía 4. Viaje Inaugural UT2600 GNL entre Mieres y Figaredo



8/01/2018 - Línea de Cercanías de Ancho Métrico F8 Baña-Collanzo

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 diésel 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.

- **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. ■

Figura 8: Detalle proyecto Renfe DMU 2600

Línea de Trabajo: Uso GNL como combustible alternativo segmento viajeros

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

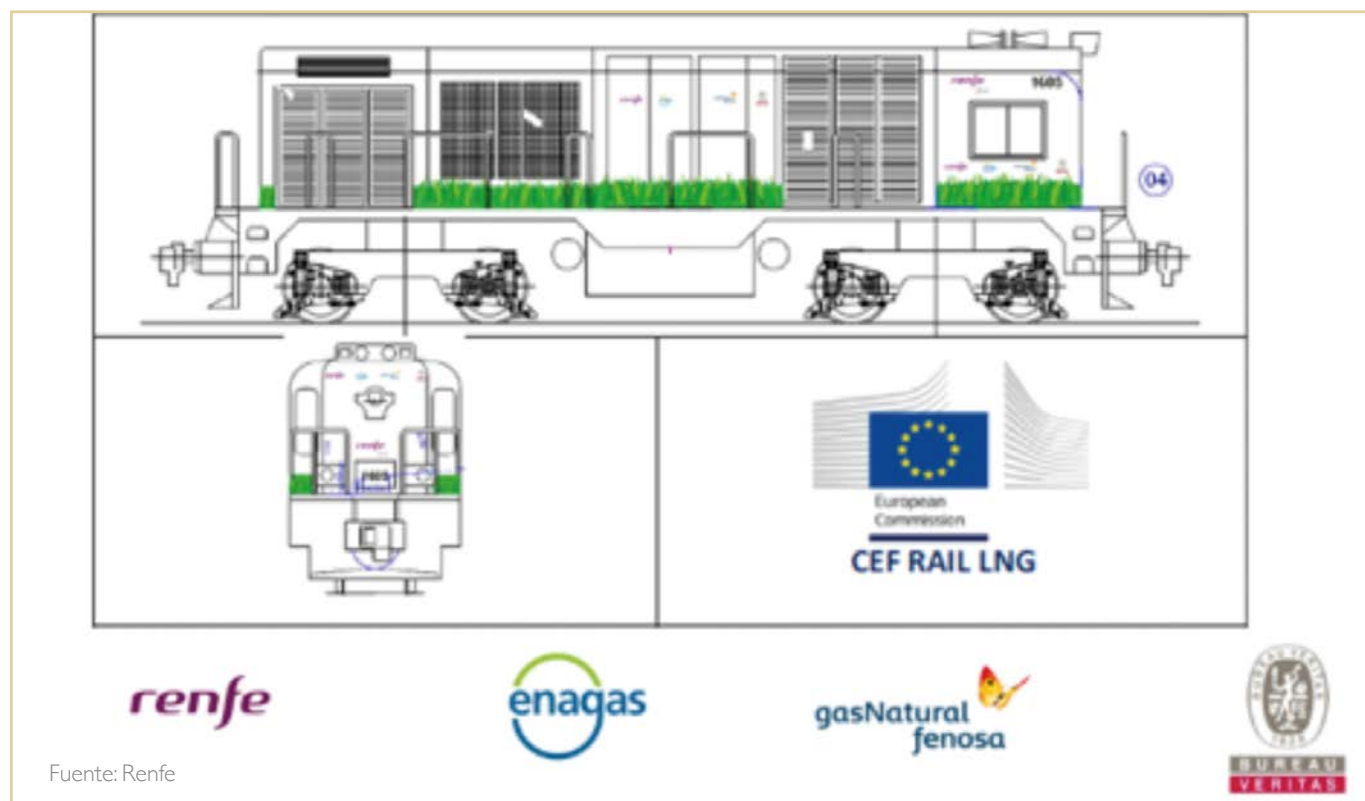
- **Presupuesto:** 1.5 MM €
- **Financiación:** Socios
- **Situación a la Fecha:**
 - Inicio de pruebas en vía: Enero 2018
 - Duración pruebas: 4 meses – 15.000 km.
- **Beneficios Esperados:**
 - Disposición de información práctica para el desarrollo de los objetivos técnicos, económicos y medioambientales 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.



Fuente: elaboración propia



Gráfica 9: Esquema pintura Locomotora 1600 GNL



Fuente: Renfe