

¿ES EL GAS NATURAL LICUADO UNA ALTERNATIVA A LA TRACCIÓN FERROVIARIA NO ELECTRIFICADA?

IS LIQUEFIED NATURAL GAS AN ALTERNATIVE TO NON-ELECTRIFIED RAIL TRACTION?

Pablo Luque Rodríguez (*), Daniel Álvarez Mántaras, Luciano Sánchez Ramos

Universidad de Oviedo

(*). Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, Campus de Gijón, C/Pedro Puig Adam, 33203 Gijón – España, +34 985182059, email: luque@uniovi.es

Recibido: DD/MM/AA – Revisado: DD/MM/AA -- Aceptado: DD/MM/AA - DOI: <https://dx.doi.org/10.6036>

ABSTRACT:

In order to reduce the environmental impact of fossil fuel consumption, the rail transport sector is analysing various alternatives for non-electrified lines. As an alternative to diesel, this study analyses the use of Liquefied Natural Gas (LNG) in rail traction. A predictive model is developed that estimates emissions on different routes. The model is fitted with real data obtained in pilot tests. In these tests, a train with two engines, one diesel and one LNG, was used. The methodology is applied to assess the impact on consumption and emissions of the two fuels on a narrow-gauge commuter line. A significant improvement is observed in some indicators, while in others the differences are minor. The conclusions that can be drawn are that operational CO₂ (greenhouse gas) emissions are lower in the LNG engine than in the diesel engine; CO emissions are lower in the diesel engine and emissions of other pollutants (nitrogen oxide and particulate matter) are higher in the diesel engine by several orders of magnitude.

Keywords: Alternative fuel; Liquefied Natural Gas; Energy consumption; Emissions; Railways

RESUMEN:

Con el objetivo de reducir el efecto medioambiental del consumo de combustibles fósiles, el sector del transporte ferroviario está analizando diversas alternativas para las líneas no electrificadas. Como alternativa al gasóleo, en el presente estudio se analiza el uso de Gas Natural Licuado (GNL) en la tracción ferroviaria. Se desarrolla un modelo predictivo que estima las emisiones en diferentes rutas. El modelo se ajusta con datos reales obtenidos en pruebas piloto. En estas pruebas se utilizó un tren con dos motores, uno diésel y otro de GNL. La metodología se aplica para evaluar el impacto en el consumo y las emisiones de los dos combustibles en una línea de cercanías de vía estrecha. Se observa una mejora significativa en algunos indicadores, mientras que en otros las diferencias son menores. Las conclusiones que pueden extraerse son que las emisiones operativas de CO₂ (gas de efecto invernadero) son menores en el motor de GNL que en el de gasóleo; las emisiones de CO son menores en el motor de gasóleo y las emisiones de otros contaminantes (óxido de nitrógeno y partículas) son mayores en el motor de gasóleo en varios órdenes de magnitud.

Palabras clave: Combustible alternativo; Gas Natural Licuado; Consumo de energía; Emisiones; Ferrocarriles

FINANCIACION

Este trabajo ha estado parcialmente financiado con ayudas del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España (ref. PID2020-112726-RB-I00) y del Principado de Asturias (ref. SV-PA-21-AYUD/2021/50994)

1.- INTRODUCCION

En línea con la preocupación actual por el medio ambiente y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el sector del transporte está inmerso en una evaluación del impacto en el medio ambiente de sus operaciones y el desarrollo e implementación de estrategias para reducirlo. Teniendo en consideración que el transporte es responsable de una cuarta parte de las emisiones de GEI en Europa [1], este sector está especialmente preocupado por la reducción de las emisiones y se esfuerza constantemente por conseguir tecnologías más eficientes y ecológicas para reducir su huella de carbono [2].

Pero los gases de efecto invernadero no son el único problema asociado a las emisiones del transporte. El sector del transporte es una de las principales fuentes de contaminantes atmosféricos que pueden causar diversos impactos en la salud, especialmente en las zonas urbanas y suburbanas. Los motores de combustión emiten monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, así como cenizas (hollines) o partículas sólidas (PM). La exposición a estos contaminantes tiene efectos nocivos sobre la salud humana, afectando a diferentes órganos y sistemas, y se asocia a un aumento de la mortalidad [3,4].

El transporte ferroviario se considera la mejor opción de transporte terrestre para lograr una reducción significativa de las emisiones debido a sus numerosas ventajas económicas, sociales, energéticas y medioambientales. A pesar de ello, si no se moderniza el actual material rodante ferroviario, así como las infraestructuras, las emisiones no se reducirán apreciablemente [5]. Por lo tanto, es necesario un esfuerzo de avance tecnológico, con el consiguiente desarrollo de la inversión asociada para lograr una reducción de las emisiones de GEI y otros contaminantes atmosféricos [6].

Las emisiones no se producen únicamente debido al funcionamiento de los vehículos, sino que, adicionalmente, provienen de otras fuentes indirectas como por ejemplo la construcción y mantenimiento de todas las infraestructuras y de los sistemas de transporte de energía [7]. Son múltiples las formas de contaminación que intervienen y se correlacionan con el aumento de la actividad del transporte ferroviario. Dichas emisiones contaminantes, dadas como valores medios, son principalmente de CO: 1,6 g/kWh; hidrocarburos inquemados: 0,81 g/kWh; NOx: 9,5 g/kWh, PM: 0,22 g/kWh [8].

En las últimas décadas, el ferrocarril ha sido impulsado, en su gran mayoría, por propulsores eléctricos o diésel. En la sociedad existe la idea, aceptada como un axioma, de que la tracción eléctrica es más eficiente y ecológica que la diésel. Sin embargo, si se considera toda la cadena de suministro, algunos estudios llegan a poner en duda tal afirmación. Como ejemplo, la eficiencia energética del pozo a la rueda (Well to Wheel, WTW, es decir, la eficiencia del transporte de combustible, generación de electricidad, etc.) de los trenes en el Reino Unido es del 26%, tanto para los modos de funcionamiento diésel como eléctrico [9]. Otro estudio realizado en el Reino Unido reveló que las emisiones WTW de los trenes de propulsión eléctrica son mayores que las de las locomotoras diésel [2].

En [10] se analiza el sector del transporte ferroviario en la India. Se adoptó un enfoque WTW para cuantificar las emisiones de las locomotoras diésel y eléctricas, y se concluyó que la huella de carbono acumulada por el funcionamiento de las locomotoras eléctricas era mayor. Destaca también el trabajo [11] que propone un método para medir la ecoeficiencia de las locomotoras diésel basado en las métricas del World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) para evaluar la ecoeficiencia de las locomotoras.

En las dos últimas décadas, la industria ferroviaria ha participado en una investigación cada vez más intensa en el campo de los combustibles alternativos, cuyo objetivo es encontrar sustitutos para el combustible diésel, de alto contenido en carbono, que no solo contamina el aire, sino que también aumenta los costes de explotación [12].

En 2012, Clean European Rail-Diesel [13] presentó un informe sobre el impacto y el rendimiento de los combustibles alternativos en aplicaciones ferroviarias. El objetivo principal era estudiar los diferentes tipos de combustible utilizados en aplicaciones ferroviarias y su efecto en los parámetros del motor.

El biodiésel es la alternativa más consolidada al gasóleo, ya que muchos motores diésel pueden funcionar con una mezcla de biodiésel y gasóleo sin sufrir ninguna modificación [14]. Las mezclas de biodiésel de hasta el 20% son técnicamente viables, aunque aumentan el consumo de combustible en un 10% en comparación con el diésel actual. Se ha comprobado que la integración de reductores catalíticos selectivos y el aumento del biodiésel utilizado (incluida la mezcla con diésel petroquímico) puede ser una solución inmediata que aporte beneficios, como la reducción del impacto ambiental de hasta el 50% [8].

El torio es otra posible fuente de energía que ha llamado la atención del público en los últimos años que, combinado con un material fisible (por ejemplo, el uranio), puede utilizarse para generar energía nuclear [15] y ser aplicable en el sector del transporte.

Entre los combustibles alternativos viables para la tracción ferroviaria no electrificada destacan el gas natural (esencialmente metano) y el hidrógeno [16]. Sin embargo, teniendo en cuenta la viabilidad técnica de la solución, la disponibilidad y la existencia en todo el mundo de una infraestructura bien establecida, el uso del gas natural parece ser una opción viable para el ferrocarril [8].

En el transporte, el gas natural se utiliza en dos formas, ya sea GNC (gas natural comprimido) o GNL (gas natural licuado). El GNC se almacena en forma gaseosa, a alta presión. Sin embargo, el volumen de los tanques de almacenamiento de GNC se considera demasiado grande para ser acomodado en el material rodante ferroviario de tracción. El GNL soluciona en parte el problema del volumen ya que permite un almacenamiento con mejor densidad energética, lo que permite una mayor autonomía.

El GNL es un gas natural convencional que se ha enfriado a -161,5 °C para licuarlo. Como resultado, el volumen de gas natural puede reducirse 600 veces y se obtiene un líquido claro, incoloro, inodoro, no tóxico y no corrosivo, que puede distribuirse fácilmente por mar o por carretera [17]. El GNL puede utilizarse tanto en motores de combustión interna como en pilas de combustible y turbinas de gas.

Sin embargo, hay varios retos que limitan el uso del gas natural como combustible ferroviario. El GNL es un combustible criogénico que tiene requisitos específicos, como son los sistemas de abastecimiento y los propios depósitos embarcados. La actual infraestructura ferroviaria está diseñada para propulsores diésel, el uso del GNL obligaría a profundas modificaciones tanto de

instalaciones como de operativa. Otro reto es la necesidad de una solución técnica para gestionar la regasificación que se produce en los tanques criogénicos, especialmente en el caso de grandes volúmenes.

Las emisiones de los motores que utilizan gas natural han sido objeto de numerosos estudios. En [18,19] se lleva a cabo una investigación experimental para examinar los efectos en las emisiones de un motor encendido por compresión en el que el combustible diésel líquido se sustituye parcialmente por gas natural en varias proporciones, con el gas natural inyectado en el aire de admisión. Los resultados experimentales revelan el efecto beneficioso de la presencia de gas natural sobre las emisiones de óxido nítrico, monóxido de carbono, hidrocarburos quemados y hollín.

En [20] se analizan las posibilidades del uso gas natural licuado como combustible frente a las soluciones convencionales que provienen del petróleo. Los autores indicaron que el GNL es más económico y sostenible que el GNC, ya que el GNL puede reducir el coste por kilómetro entre 1,5 veces y 2-2,5 veces en comparación con el GNC. Además, el depósito criogénico puede transportar de dos a tres veces más gas por unidad de volumen que los depósitos de GNC. Frente a los vehículos que funcionan con GNC, el GNL ofrece una solución práctica para las estaciones de repostaje de GNC. El estudio sugiere la conversión de las instalaciones actuales en estaciones de servicio combinadas que puedan suministrar GNL además de gasóleo.

Además, en [8] se discute y evalúan algunas opciones energéticas novedosas para aplicaciones ferroviarias “limpias”. Introducen un criterio novedoso para evaluar el impacto ambiental. Este criterio se denomina “trabajo de impacto ambiental del efluente contaminante”, que se calcula a partir de la exergía química de las especies contaminantes. La exergía química es una medida real del impacto producido por el contaminante en el medio ambiente. El mencionado estudio llega a evaluar que el impacto medioambiental del pozo a las ruedas (WTW) de una locomotora alimentada con gas natural es al menos un 15% menor que el de una locomotora diésel-eléctrica equipada con un reductor catalítico selectivo. Por otro lado, se calcula el impacto ambiental en términos de trabajo de impacto ambiental y el coste de la contaminación ambiental y se concluye que son bastante similares para el gas natural, el amoníaco, el metanol y el biodiésel. El estudio del impacto medioambiental del ciclo de vida arroja el resultado de que las emisiones de las locomotoras de gas natural son, en general, un 15% más bajas que las diésel-eléctricas convencionales. Como conclusión del trabajo, postulan que el GNL representa una opción potencial de primer orden para el transporte ferroviario limpio.

En 2020, Langshaw et al. [21] evalúan el rendimiento medioambiental y económico del GNL como combustible de transición para sustituir al diésel en vehículos pesados. Se realiza una evaluación del pozo a las ruedas (WTW) basada en ciclos de conducción de vehículos pesados para determinar las emisiones de GEI del ciclo de vida asociadas al GNL en relación con el diésel. El análisis se complementa con un enfoque probabilístico para determinar el coste total de propiedad en diversos escenarios. Las metodologías se validan a través de un caso de estudio relativo a vehículos que operan en el Reino Unido, utilizando datos proporcionados por un gran transportista del sector de la alimentación. Se observó que los vehículos de GNL con encendido por chispa eran un 18% menos eficientes energéticamente que sus homólogos diésel, lo que suponía un aumento del 7% en las emisiones de GEI del pozo a las ruedas. Sin embargo, el estudio señala que es factible una reducción de hasta el 13% si los vehículos de GNL alcanzan la paridad de eficiencia con el diésel.

Por su parte, el trabajo de Madhusudhanan et al. publicado en 2020 [22] compara un vehículo pesado convencional alimentado con diésel con uno que funciona con gas comprimido (CG): ya sea GNC o biometano. Incluye una evaluación del rendimiento del transporte, las emisiones de carbono y los costes totales. Como resultados apuntan que los vehículos propulsados con GNC, presentan unas emisiones de carbono equivalentes un 10% inferiores a las del diésel de referencia, y cuando funcionan con biometano, sus emisiones de carbono equivalentes son un 78% inferiores. En comparación con el transporte de larga distancia, los beneficios son menores para las operaciones regionales, y son más bajos aun para las operaciones urbanas, durante las cuales, usando GNC, las emisiones de carbono equivalentes del camión CG son mayores que las del camión diésel.

McFarlan, también en 2020 [23], evalúa la sustitución del gasóleo por el gas natural licuado (GNL) en las comunidades remotas de Nunavut (Canadá). La metodología utiliza un modelo económico para calcular los costes de suministro que incluye los costes de la terminal, los costes de transporte y el coste anual de almacenamiento in situ. Se compara la implantación de GNL o de electricidad renovable en cinco lugares remotos de Nunavut. El estudio concluye que los costes de las diversas alternativas están en el mismo rango.

Pocos estudios han evaluado de forma exhaustiva el impacto medioambiental del GNL como combustible alternativo en la salud humana, los ecosistemas y los recursos desde la perspectiva del ciclo de vida. En particular, el beneficio medioambiental de la promoción de los vehículos de GNL suele ser complicado e incierto. Sun y Ertz [24] proponen el uso de una combinación de análisis del ciclo de vida y una simulación con el método de Monte Carlo para evaluar los beneficios medioambientales de la conversión de vehículos pesados a GNL. Aunque las conclusiones son solo aplicables a un caso particular, este tipo de trabajos puede ser de aplicación en otras ubicaciones.

En relación con la implementación del GNL en la tracción en el estado del arte, solo existen referencias sobre el uso en locomotoras de gran potencia, como por ejemplo en Rusia [25-28], Canadá [29,30], Estados Unidos [31-35] o Estonia [36].

Tal y como se ha indicado, diferentes estudios revelan que el gas natural es una alternativa técnicamente viable al gasóleo. Además, se ha demostrado que reduce significativamente las emisiones contaminantes, como las partículas y los NOx. Dado que estas emisiones tienen un impacto significativo en la salud cuando se producen en entornos urbanos, el gas natural sería un combustible más adecuado que el gasóleo en trenes de cercanías. Sin embargo, en el estado del arte, se constata que no existen referencias del uso del GNL en tracción ferroviaria en automotores de transporte de viajeros aplicables a líneas de transporte de cercanías.

Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente el presente trabajo aborda el estudio la primera aplicación del uso de GNL en Unidades Múltiples Diésel de transporte de pasajeros en redes de cercanías. El principal objetivo será la evaluación del impacto que tendría la aplicación de este combustible en la red actual.

Para ello se propone e implementa una metodología de trabajo que se aplica en España, donde en 2017 el operador español RENFE inició las pruebas piloto de un tren de pasajeros autopropulsado con gas natural licuado (GNL). Las pruebas tuvieron lugar en una red de vía estrecha (vía de ancho métrico – FEVE). Un motor alimentado con GNL sustituye a uno de los dos motores diésel utilizados en una composición ferroviaria de dos automotores, y el segundo motor diésel se utiliza para comparar los resultados de la operación (emisiones y consumo) con tracción diésel y GNL [37,38].

2.- MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo compara las emisiones de una unidad múltiple de transporte ferroviario que utiliza como combustibles GNL y gasóleo en diferentes condiciones de funcionamiento. Se desarrolla e implementa un modelo predictivo basado en inteligencia artificial. Este modelo se perfecciona y valida con los resultados de las pruebas piloto. El modelo final permite que los resultados obtenidos puedan ser extrapolados a otras rutas o redes ferroviarias. Esta metodología de evaluación sigue las directrices marcadas por [39].

Para llevar a cabo la prueba piloto, se utilizó una unidad múltiple diésel de la serie 2600 de RENFE (2 automotores, configuración M-M), que se utiliza en servicios de cercanías en líneas no electrificadas. Esta serie fue construida entre 1966 y 1974 por MAN-MMC-Ateinsa, y los vehículos fueron posteriormente transformados (1999-2001) por FEVE (actualmente la compañía ferroviaria española Renfe Ancho Métrico) y CAF-Sunsundegui. Tienen una capacidad de 48+48 plazas sentadas y una velocidad máxima es de 80 km/h. La configuración previa a la transformación para tracción con gas natural incluye, en cada unidad un motor diésel, de la marca Volvo THD 101 GB con 6 cilindros horizontales en línea. Los cilindros tienen un diámetro de 120,65 mm y una carrera de 140 mm. Con una potencia nominal (según la norma ISO1585) de 163 kW@t 2200 rpm, y un par nominal de 780 Nm@1400 rpm. Estos motores cumplen los límites de nivel de emisiones según la norma ECE 24-02, ECC 72/306.

Una de las unidades se sometió a una conversión a GNL. El motor diésel original se sustituyó por un motor de gas natural Cummins ISL GeEV280, mientras que la otra unidad conserva el motor diésel original. El motor de GNL tiene una cilindrada de 8,9 litros con SCR (reducción catalítica selectiva). Este motor cumple con la normativa de emisiones Euro 5 y ADR80/3. Es un motor de 4 tiempos, de 6 cilindros en línea, turboalimentado, con un diámetro y carrera: 114x145mm, Potencia (según SAE J1995) de 209kW@2000 rpm y par motor de 1700 Nm (1300-1400 rpm). El Cummins ISL GeEV 280 tiene un 28% más de potencia nominal y un 56% más de par máximo en comparación con el Volvo THD 101GB (Fig. 1).

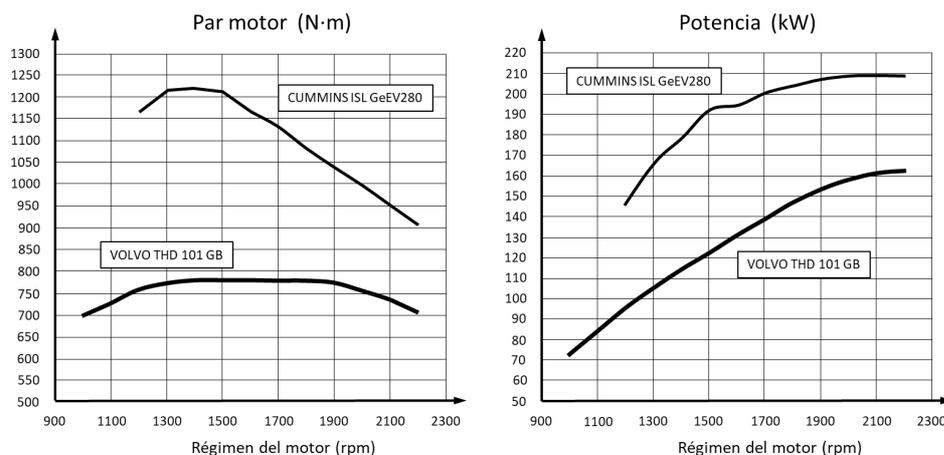


Fig 1. Curvas de características del motor

Además, la Unidad Múltiple fue sensorizada para obtener todos los parámetros, tanto operacionales como ambientales, necesarios para refinar y validar el modelo predictivo. AVL Ibérica, S.A realizó mediciones de emisiones a bordo con un Sistema Portátil de Medición de Emisiones (PEMS). Este equipamiento permite la monitorización de las emisiones de monitorizado THC (hidrocarburos totales), CO, CO₂, NO₂, O₂ en los gases de escape. Se incluyeron sensores adicionales, como un medidor de flujo de combustible, (medidor de flujo de gas o de gasóleo), acelerómetros, registradores de datos...

Tras una fase de pruebas estáticas y una vez obtenidas las correspondientes autorizaciones de circulación y ensayo, la unidad fue probada en el norte de España. Las pruebas operativas se realizaron entre las estaciones de Trubia y Figaredo, pertenecientes a la línea de cercanías Trubia-Collanzo de RENFE (vía estrecha, ancho métrico). La fase de pruebas operativas se completó en 2020, tras superar un importante número de horas de funcionamiento y unos 4000 kilómetros recorridos. Se diseñó y realizó un programa experimental con el fin de obtener información suficiente para implementar y validar un modelo predictivo inteligente (IPM) [40]. Para ello se aplicaron técnicas de inteligencia artificial, basadas en las variables de operación disponibles, el diseño de la ruta, las condiciones ambientales y la carga del vehículo.

El modelo desarrollado proporciona una predicción de las variables relacionadas con el consumo y las emisiones del vehículo. La principal utilidad de este IPM es cuantificar las diferencias de consumo, contaminación y coste en diferentes escenarios futuros de implantación del GNL. El IPM permite extrapolar las condiciones de operación y simular los cambios en las emisiones de los vehículos ante la variación de las rutas y las diversas condiciones ambientales. Con esta herramienta validada, se dispone de la capacidad para realizar análisis de ciclo de vida, con la estimación de las emisiones de GEI extendida a toda una red de transporte ferroviario (local, regional, nacional o internacional).

3.- RESULTADOS

La metodología propuesta implementa el modelo predictivo validado de la unidad 2600 en el tramo entre Figaredo y Collanzo. Esta vía de RENFE de ancho estrecho atraviesa varios núcleos de población. La metodología propuesta se aplica para evaluar el efecto de un posible cambio en el combustible utilizado en los trenes de cercanías, pasando del tradicional gasóleo a soluciones alternativas de GNL. El resultado buscado es la evaluación de las emisiones en el tramo de estudio, tanto de forma global como en detalle en cada punto de la red, para correlacionarlas con la presencia de zonas densamente pobladas.

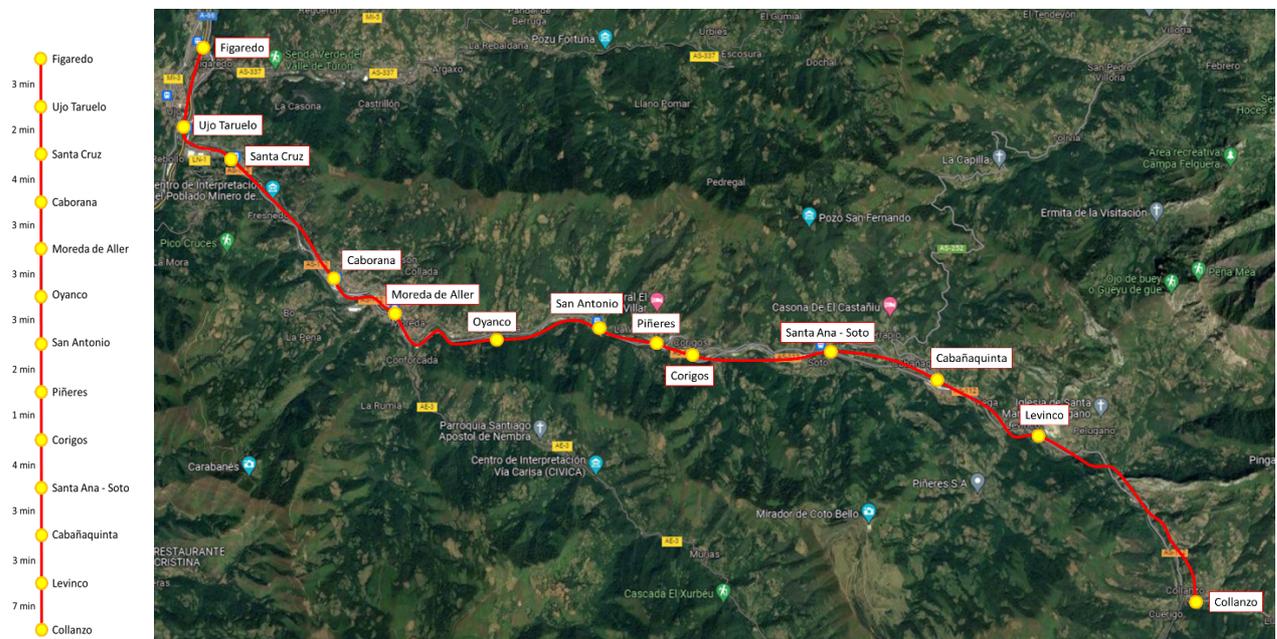


Fig. 2. Estaciones y tiempos de viaje previstos en el tramo analizado

Se dispone de un perfil detallado de la infraestructura ferroviaria, con información tanto de las pendientes como de las curvas, las estaciones de tren y otros puntos de parada. También se dispone del perfil de velocidad comercial establecido para el tramo en ambos sentidos de circulación y de la temporización prevista (Figura 2).

La metodología propuesta, aplicada al tramo estudiado, permite obtener de forma detallada tanto el consumo de combustible como las emisiones. Estos valores pueden obtenerse de forma promediada para todo el recorrido de la línea en ambos sentidos de circulación. Estos resultados, expresados en unidades por km, se muestran en la Figura 3. Las unidades de consumo de combustible para el motor diésel se expresan en l, y las de GNL en kg

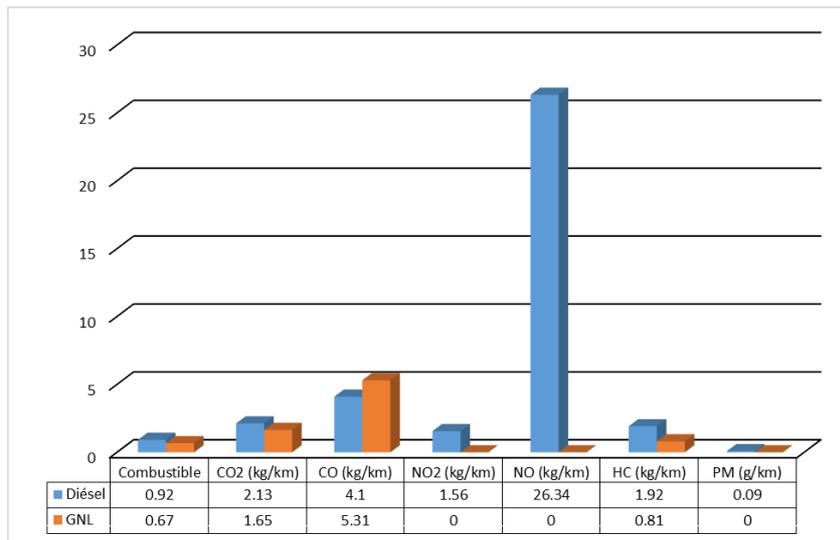


Fig. 3. Valores medios de emisión por km

Se puede apreciar que las emisiones totales del motor diésel son mayores. Este valor de las emisiones totales está claramente influenciado por las altas emisiones de NO. Esto se debe principalmente a que, en este motor diésel, no hay un tratamiento posterior de los gases de escape para la reducción catalítica de los óxidos de nitrógeno.

La metodología propuesta permite determinar tanto el consumo como las emisiones en cada punto concreto del recorrido. Resulta especialmente interesante la correlación de estos valores con la densidad de población de las zonas por las que transita la unidad múltiple analizada.

4.- CONCLUSIONES

Para explorar la posibilidad de sustituir el gasóleo como combustible de los vehículos ferroviarios, se plantea el uso del GNL. En el marco de un consorcio público-privado, el operador español RENFE realizó una prueba piloto de un tren de pasajeros autopropulsado con GNL. Las pruebas han permitido ajustar y validar un modelo predictivo inteligente para evaluar y comparar el funcionamiento con combustible tradicional (diésel) y con GNL. Este modelo se ha aplicado a un tramo de vía de estudio, en el que se han analizado tanto el consumo como las emisiones en condiciones reales de operación comercial.

En relación con el consumo instantáneo, el motor de GNL tiene un menor consumo instantáneo (medido en kg/s) que el diésel (en l/s). Se midieron con precisión las emisiones de CO₂ y otros gases provenientes de ambos motores y se constató que presentan valores similares. Como los factores de emisión son similares (2,79 kg de CO₂ por litro de gasóleo, frente a 2,75 kg de CO₂ por kg de GNL) los datos de medición de las emisiones de CO₂ apoyan la conclusión anterior de que los consumos de combustible son menores en los motores de GNL.

Analizando las emisiones instantáneas de gases de efecto invernadero, se ha obtenido que las emisiones de CO₂ son menores en el motor de GNL. Las emisiones de metano no quemado del motor de GNL son inferiores a las emisiones de hidrocarburos inquemados del motor diésel, con lo que no constituyen una emisión significativa de gases de efecto invernadero. En este análisis no se han tenido en cuenta las posibles emisiones o escapes en los procesos de repostaje y el mantenimiento del vehículo, ya que son procedimientos que están por definir.

En cuando a las emisiones instantáneas de contaminantes, las emisiones de NO, NO₂ y partículas (hollín) del motor diésel son mayores que las correspondientes del motor de GNL en todos los escenarios de funcionamiento, y en varios órdenes de magnitud. De hecho, las emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas del motor de GNL fueron insignificantes. Las emisiones de CO del motor diésel fueron inferiores a las del motor de GNL.

Las conclusiones generales que se pueden extraer coinciden con las expresadas para los datos instantáneos: (1) las emisiones de CO₂ (gas de efecto invernadero) son menores en el motor de GNL que en el diésel, en ausencia de consideraciones de venteos de metano, (2) las emisiones de CO son menores en el motor diésel (3) las emisiones de contaminantes (óxido de nitrógeno y partículas) son mayores en el motor diésel en varios órdenes de magnitud.

Como conclusión final se puede indicar que el uso del GNL como combustible conduce a la mejora de algunos indicadores, mientras que otros valores no muestran mejoras significativas. En todo caso, se ha constado que el empleo del GNL reduce las emisiones contaminantes (como las partículas y los NO_x) por lo que se trata de un combustible más adecuado para la aplicación en trenes con recorridos en entornos urbanos o de alta densidad de población.

REFERENCIAS

- [1] European Environment Agency. "Greenhouse gas emissions from transport in Europe" [WWW Document]. 2021. URL <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-transport> (accessed 20.12.21).
- [2] Esters, T., Marinov, M., 2014. "An analysis of the methods used to calculate the emissions of rolling stock in the UK". *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 33, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.08.012>
- [3] Kampa, M., Castanas, E., 2008. "Human health effects of air pollution. *Environ.* *Pollut.* 151, 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- [4] Pope, C.A., Dockery, D.W., 2006. "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect". *J. Air Waste Manag. Assoc.* 56, 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- [5] Logan, K.G., Nelson, J.D., McLellan, B.C., Hastings, A., 2020. "Electric and hydrogen rail: Potential contribution to net zero in the UK". *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 87, 102523. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102523>
- [6] Mulley, C., Hensher, D.A., Cosgrove, D., 2017. "Is rail cleaner and greener than bus?". *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 51, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.12.004>
- [7] Network Rail, 2009. "Comparing environmental impact of conventional and high speed rail". Network Rail, UK.
- [8] Dincer, I., Zamfirescu, C., 2016. "A review of novel energy options for clean rail applications". *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 28, 461–478. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.12.007>
- [9] Hoffrichter, A., Miller, A.R., Hillmansen, S., Roberts, C., 2012. "Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways". *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 17, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.002>
- [10] Gangwar, M., Sharma, S.M., 2014. "Evaluating choice of traction option for a sustainable indian railways". *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 33, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.08.025>
- [11] Carvalhaes, B.B., Rosa, R. de A., D'Agosto, M. de A., Ribeiro, G.M., 2017. "A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive". *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 51, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.031>
- [12] Railway Technology, 2021. "Hydrail and LNG: the future of railway propulsion?" [WWW Document]. URL <https://www.railway-technology.com/features/featurehydrail-lng-future-railway-propulsion-fuel/> (accessed 21.12.21).
- [13] Palacin, R., 2012. "Clean European Rail-Diesel. Impact and performance of alternative fuel in rail applications".
- [14] US Department of Energy, 2021. "Alternative Fuels Data Center: Diesel Vehicles Using Biodiesel" [WWW Document]. URL <https://afdc.energy.gov/vehicles/diesel.html> (accessed 20.12.21).
- [15] World Nuclear Association, 2020. "Thorium - world nuclear association" [WWW Document]. World Nucl. Assoc. URL <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx> (accessed 21.12.21).
- [16] Zhardemov, B., Kanatbayev, T., Abzaliev, T., Koilybayev, B., Nazarbekova, Z., 2019. "Justification of location of LNG infrastructure for dual-fuel locomotives on the railway network in Kazakhstan". *Procedia Comput. Sci.* 149, 548–558. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.175>
- [17] Pfoser, S., Aschauer, G., Simmer, L., Schauer, O., 2016. "Facilitating the implementation of LNG as an alternative fuel technology in landlocked Europe: A study from Austria". *Res. Transp. Bus. Manag.* 18, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2016.01.004>
- [18] Papagiannakis, R.G., Hountalas, D.T., 2003. "Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine". *Appl. Therm. Eng.* 23, 353–365. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00187-4)
- [19] Papagiannakis, R.G., Kotsiopoulos, P.N., Zannis, T.C., Yfantis, E.A., Hountalas, D.T., Rakopoulos, C.D., 2010. "Theoretical study of the effects of engine parameters on performance and emissions of a pilot ignited natural gas diesel engine". *Energy* 35, 1129–1138. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.006>
- [20] Peredel'skii, V.A., Lastovskii, Y. V., Darbinyan, R. V., Savitskii, A.I., Savitskii, A.A., 2005. "Analysis of the desirability of replacing petroleum-based vehicle fuel with liquefied natural gas". *Khimicheskoe i Neftegazov. Mashinost.* 41, 18–21.
- [21] Langshaw, L., Ainalis, D., Acha, S., Shah, N., Stettler, M.E.J., 2020. "Environmental and economic analysis of liquefied natural gas (LNG) for heavy goods vehicles in the UK: A Well-to-Wheel and total cost of ownership evaluation". *Energy Policy* 137, 111161. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111161>
- [22] Madhusudhanan, A.K., Na, X., Boies, A., Cebon, D., 2020. "Modelling and evaluation of a biomethane truck for transport performance and cost". *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 87, 102530. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102530>

- [23] McFarlan, A., 2020. "Techno-economic assessment of pathways for liquefied natural gas (LNG) to replace diesel in Canadian remote northern communities". *Sustain. Energy Technol. Assessments* 42, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100821>
- [24] Sun, S., Ertz, M., 2020. "Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles". *MethodsX* 7, 101046. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101046>
- [25] LNG Processing Plants, 2017. "LNG_Trucks_2014-2017" [WWW Document]. URL http://lngplants.com/LNG_Trucks_2014-2017.html (accessed 21.12.21).
- [26] Barrow, K., 2018. "Russian gas turbine locomotive hauls 9000-tonne train" *International Railway Journal* [WWW Document]. Rail J. URL <https://www.railjournal.com/locomotives/russian-gas-turbine-locomotive-hauls-9000-tonne-train/> (accessed 21.12.21).
- [27] Zasiadko, M., 2019. "Sinara Group assembles new type of LNG-powered locomotive" *RailTech* [WWW Document]. RailTech.com. URL <https://www.railtech.com/rolling-stock/2019/07/16/sinara-group-assembles-new-type-of-lng-powered-locomotive/?gdp=accept> (accessed 21.12.21).
- [28] Ford, N., 2019. "Getting LNG on the rails" *LNG Condensed* 1.
- [29] Gameau, S., 2013. "Canadian National Railways tests natural gas/diesel fuel powered locomotives between Edmonton and Fort McMurray AB". *Transp. Danger. Goods. Newsl.* 33, 1.
- [30] Canadian Railway Observations, 2013. "Motive Power News" [WWW Document]. *Can. Railw. Obs.* URL <https://canadianrailwayobservations.com/RESTRICTED/2013/october/cn.html> (accessed 21.12.21).
- [31] Railway Age, 2017. "FEC rolls out LNG". *Railway Age* [WWW Document]. URL <https://www.railwayage.com/mechanical/locomotives/fec-rolls-out-lng/> (accessed 21.12.21).
- [32] Florida East Coast Railway, 2017. "FEC Railway Gives Tour of LNG Operations". *Florida East Coast Railway* [WWW Document]. URL <https://fecrwy.com/news/blog-lng-operations/> (accessed 21.12.21).
- [33] Vantuono, W., 2017. "Florida East Coast Railway converts locomotive fleet to LNG". *International Railway Journal* [WWW Document]. Int. Railw. J. URL <https://www.railjournal.com/regions/north-america/florida-east-coast-railway-converts-locomotive-fleet-to-lng/> (accessed 2.5.21).
- [34] Vantuono, W., 2017. "IHB going CNG". *Railway Age* [WWW Document]. Railw. Age. URL <https://www.railwayage.com/news/ihb-going-cng/> (accessed 21.12.21).
- [35] Phillips, D.R., Byrne, W.P., 2018. "Latest Developments in Alternative Fuels for Rail Locomotives" [WWW Document]. *Holl. Kn. Transp. Blog.* URL <https://www.hklaw.com/en/insights/publications/2018/04/latest-developments-in-alternative-fuels-for-rail> (accessed 21.12.21).
- [36] DiGas, 2019. "Two LNG Shunter Locomotives Planned in Estonia" [WWW Document]. *NGV Glob. News.* URL <https://www.ngvglobal.com/blog/two-lng-shunter-locomotives-planned-in-estonia-1129#more-112899> (accessed 21.12.21).
- [37] Smith, K., 2017. "Renfe to trial LNG on passenger train". *International Railway Journal* [WWW Document]. Int. Railw. J. URL <https://www.railjournal.com/rolling-stock/renfe-to-trial-lng-on-passenger-train/> (accessed 21.12.21).
- [38] Via Libre, 2018. "Comienzan en Asturias las pruebas de tracción ferroviaria con gas natural licuado". *Via Libre* [WWW Document] URL <https://www.vialibreffe.com/noticias.asp?not=23000> (accessed 21.12.21).
- [39] Luque, P., Mántaras, D.A., Sanchez, L., 2021 "Artificial intelligence applied to evaluate emissions and energy consumption in commuter railways: Comparison of liquefied natural gas as an alternative fuel to diésel". *Sustainability*, 2021, 13(13), 7112, doi: <https://doi.org/10.3390/su13137112>
- [40] Sánchez L., Luque P., Álvarez D. 2021 "Assessment of the running resistance of a diesel passenger train using evolutionary bilevel algorithms and operational data". *Engineering Applications of Artificial Intelligence* Vol 105, October 2021 Article number 104405, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104405>