

**FoDAMI**

15, 16 Y 17 DE SEPTIEMBRE DE 2021

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE CONVERSIÓN DE LOCOMOTORAS DIÉSEL-ELÉCTRICAS A DUAL GNL/DIÉSEL EN EL PARQUE RODANTE DE ARGENTINA

Agustín Pennisi¹, Ezequiel Scazzola², M. A. Ramón Galache³, Claudio. P. Martins⁴

¹Departamento de Mecánica - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata. - Av. 1 750, B1900 La Plata, Buenos Aires - agustinpennisi95@gmail.com

²Departamento de Mecánica - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata. - Av. 1 750, B1900 La Plata, Buenos Aires - ezequiel.scazzola@hotmail.com

³ IAME- Departamento de Mecánica - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata. - Av. 1 750, B1900 La Plata, Buenos Aires - cmartins@ing.unlp.edu.ar

⁴ IAME- Departamento de Mecánica - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata. - Av. 1 750, B1900 La Plata, Buenos Aires - cmartins@ing.unlp.edu.ar

Resumen

La implementación del GNL como combustible en ferrocarriles se remonta a fines del siglo XX en Estados Unidos y Canadá [1], y ha ido evolucionando con el desarrollo de distintos métodos y tecnologías de inyección. Recientemente proyectos de conversión están teniendo lugar en países de Europa del Este.

El GNL en Argentina está siendo utilizado a partir de la implementación de plantas de licuefacción modulares, y se plantea como combustible para el transporte de cargas terrestres [2], ya que posee, en términos técnicos, económicos y ambientales, ventajas comparativas con respecto al Diésel por su menor coste de acuerdo a disponibilidad y su menor impacto ambiental en términos de emisiones (GEI), representando al mismo tiempo un aumento significativo en la autonomía, respecto al mismo combustible pero como gas comprimido (GNC) [3].

El presente trabajo estudia la factibilidad de conversión de locomotoras diésel-eléctricas a duales, de los modelos CRRC CDD5A1/6A1 recientemente incorporadas al parque rodante de Argentina, utilizando GNL como combustible principal y el diésel como combustible piloto a través del método de inyección directa en cámara de combustión, siendo este método el de mayor eficiencia. También se analiza la implementación de una configuración de locomotora y tender, y el diseño del sistema de evaporación del GNL para ser inyectado en el motor.

Finalmente se obtendrá un análisis comparativo de emisiones, eficiencia energética y recupero de la inversión que prueba la ventaja de implementación de este sistema con respecto al diésel.

Palabras claves: *gnl, ferrocarril, locomotora, emisiones, dual*

REFERENCIAS

[1] Schultz J.T., *Diesel/Liquid Natural Gas Locomotives: A Dual-Fuel Solution* - Era Magazine, Vol.3 (number 6) - energyconversions.com, 1992

[2] *Comienzan a circular en el país camiones impulsados por GNL*, Econojournal - <https://econojournal.com.ar/2019/01/comienzan-a-circular-en-el-pais-camiones-impulsados-por-gnl/>, 2019

[3] Osorio Tejada J., Llera E. y Scarpellini S., *LNG: an alternative fuel for road freight transport in Europe*, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 168, doi:10.2495/SD15021, 2015

1. INTRODUCCIÓN

La implementación del GNL como combustible alternativo en ferrocarriles se remonta a fines del siglo XX en Estados Unidos y Canadá [1], y ha ido evolucionando con el desarrollo de distintos métodos y tecnologías de inyección. Recientemente proyectos de conversión de locomotoras diésel – eléctricas a duales (Diésel – GNL) están teniendo lugar en países de Europa del Este [2] como respuesta a una demanda de reducir considerablemente los costos de combustibles (alrededor del 30% por la disponibilidad del recursos gasífero frente al petróleo) y de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) – principalmente de CO₂ – en busca de una transición hacia un transporte libre de carbono.

En este contexto, Argentina atraviesa un escenario similar. A partir del descubrimiento de los yacimientos no convencionales de Vaca Muerta, catalogado como un recurso de clase mundial que posiciona al país como el segundo a nivel global en reservas de shale gas [3] y a partir del desarrollo de este recurso impulsado por políticas públicas como el Plan de Promoción de la Producción del Gas Natural Argentino 2020-2024 (Plan Gas.Ar) [4] que prevé el desarrollo de la explotación de los yacimientos no convencionales de gas y la inversión en tecnologías para la licuefacción, se crea un escenario inmejorable para alentar el desarrollo del GNL como combustible para impulsar al transporte [5].

Por otra parte, y en la búsqueda de reducir el impacto ambiental a través de la reducción de GEI, especialmente carbono, el GNL abre una puerta interesante como una transición moderada hacia alternativas más limpias para el transporte [6], aprovechando los recursos existentes y abundantes de la matriz energética Argentina.

El objetivo de este trabajo es estudiar la factibilidad de conversión de un tipo de locomotora diésel-eléctrica del parque tractivo nacional, a dual, utilizando GNL como combustible principal y el diésel como combustible piloto. Para ello se selecciona un método de inyección adecuado, se analiza la implementación de una configuración de locomotora y tender, y se realiza el cálculo y diseño del sistema de evaporación del GNL para ser inyectado en el motor.

Finalmente se obtienen como resultados el incremento de la autonomía, la reducción relativa de emisiones y la reducción de los costos operativos, manteniendo la eficiencia del motor de combustión. También se muestra en forma relativa, la tasa de recupero de la inversión.

2. SELECCIÓN DE LA UNIDAD TIPO A CONVERTIR

La selección de la unidad tipo a convertir se basa en dos parámetros generales, que se indican y explican a continuación:

- a) Disponibilidad para el sistema de cargas

Implícitamente dentro de los objetivos, es que los resultados se puedan aplicar a optimizar la red de carga ferroviaria argentina.

- b) Motorización conveniente

Es requerimiento que la misma sea con un motor diésel de generación avanzada y potencia adecuada para la aplicación.

En la evaluación del parque tractivo de argentina, el cumplimiento de estos parámetros se obtiene para las locomotoras de la firma CRRC adquiridas para la empresa Belgrano Cargas y Logística, para operar en trocha 1676 con el modelo CDD5A1 (67 locomotoras) y en trocha métrica con el modelo CDD6A1 (40 locomotoras). Ambos modelos equipados con un motor MTU 16V 4000 R43 de 2.200 kW de potencia que cumple con la normativa EU IIIA. [7][8]

3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE INYECCIÓN

Existen distintos tipos de inyección para sistemas dual diésel – Gas Natural (GN) y específicamente probados en motores de locomotoras [9]. La diferencia entre ellos reside en la presión de inyección, ubicación de los inyectores y proporción de sustitución del combustible diésel.

En particular se analiza – en potencial – el método de inyección directa a alta presión del gas (HPDI) dentro del cilindro desarrollado por la firma Westport [10], con el objetivo de no sufrir pérdidas significativas de rendimiento y eficiencia del motor, pero al mismo tiempo bajar las emisiones para que se puedan alcanzar niveles de emisiones dentro de los parámetros de la normativa EURO V, implementada en Argentina a partir de 2018 [11]. De acuerdo a trabajos previos, la relación de sustitución de combustible diésel puede ser de hasta 92% [12], siendo el 8% restante utilizado como combustible piloto. Si bien se puede lograr un valor de sustitución de 92%, se toma para el cálculo un valor de 90% para dejar un margen de incertidumbre considerable. Lo expuesto se indica en la Figura 1.

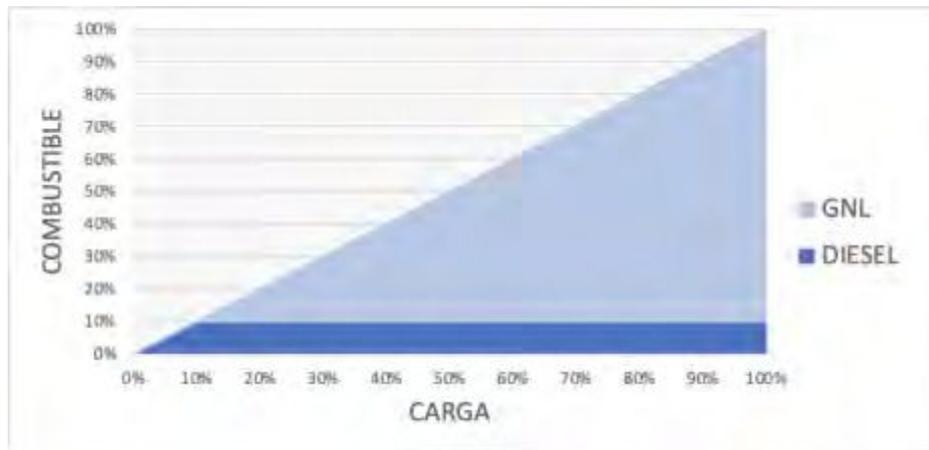


Figura 1. Relación de combustible GNL/diésel utilizando el método HPDI

Para optimizar el encendido por compresión, es necesario inyectar el GN cerca del punto muerto superior. Sin embargo, dado su muy bajo índice de cetano, se requiere utilizar al diésel como combustible piloto. Para esto no es necesario modificar el motor diésel, sino reemplazar los inyectores originales por uno para HPDI. El mismo consta de dos agujas concéntricas; una aguja de gas envolvente que encierra a la aguja por donde se inyecta el diésel. La inyección de diésel se realiza primero, teniendo lugar por los orificios de la aguja central, e inmediatamente después ocurre la inyección de GN por boquillas separadas, ubicadas más arriba en el cuerpo del inyector como se muestra en la Figura 2.

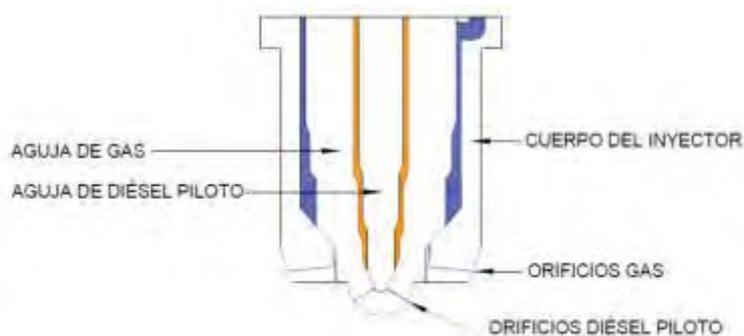


Figura 2: Esquema de un inyector para HPDI de doble aguja.

4. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

El sistema propuesto puede apreciarse en el flujograma de la Figura 3. El GNL es movido desde el tanque por una bomba criogénica la cual eleva la presión y lo hace pasar a través de un evaporador para luego ingresar al cilindro en estado gaseoso y a alta presión, por medio de los inyectores que son comandados por el encendido del motor.

Para el sistema de evaporación se busca el efecto conjunto de aprovechar la entalpía del agua de refrigeración extraída a través de una bomba, ayudando al gas a evaporarse al tiempo que refrigera el agua proveniente del motor.

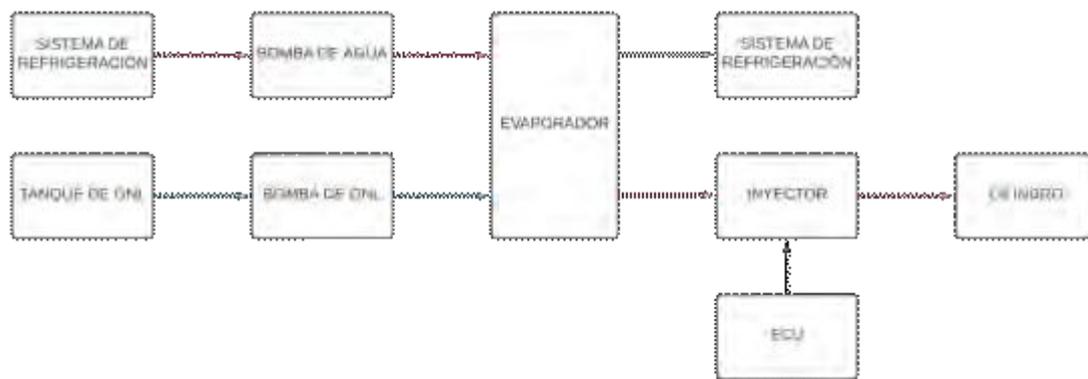


Figura 3: Flujograma del sistema dual diésel - GNL.

5. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO EN MODO DUAL

Para el cálculo de los parámetros de funcionamiento en modo dual, se toma el máximo consumo de combustible específico (g_e) dado por el régimen del motor a potencia máxima efectiva (N_e). Estos valores se obtienen de las especificaciones del fabricante [13].

Con este valor se determina de Ecuación (1) el caudal másico para el combustible diésel y consecuentemente la potencia suministrada. Suponiendo que mediante el método de inyección directa a alta presión la potencia suministrada no se modifica (o su variación es despreciable), y además que la relación de sustitución de combustible diésel - GNL es de 10% - 90%, de acuerdo a Ecuación (2), se obtienen los valores de caudales indicados en Tabla 1.

$$\dot{m}_D = N_e * g_e \quad (1)$$

$$N_{sum} = \dot{m}_D * PCI_D = (\dot{m}_{M,d} * PCI_M) + (\dot{m}_{D,d} * PCI_D) \quad (2)$$

Tabla 1. Valores de caudales a máxima potencia

Caudal diesel $\dot{m}_{d,l}$	0,1265 kg/s
Diesel piloto $\dot{m}_{d,d}$	0,011 kg/s
Gas $\dot{m}_{m,d}$	0,099256 kg/s

6. EVAPORACIÓN DEL GNL

La misma se materializa por un intercambiador a contraflujo donde calor necesario para la evaporación es extraído del sistema de refrigeración del motor diésel. Por la tubería interna circulará el gas y por la externa el agua de refrigeración del motor. El diseño del evaporador tiene en cuenta la temperatura del gas a la entrada del sistema de inyección. Se toma para la misma como parámetro de diseño una temperatura de salida del evaporador de 293 K. Se considera la ubicación del evaporador sobre la locomotora.

Para el dimensionamiento del evaporador se parte del calor total a transferir al GNL, dependiente del cambio de fase del metano y su posterior elevación de temperatura hasta la temperatura de diseño de salida del evaporador. Una vez conocido el calor total, se calcula el caudal necesario de agua, de acuerdo a Ecuación (3), como el producto del calor total transferido al metano, sobre el salto entálpico del agua debido al enfriamiento de esta.

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_M [H_{vM} + C_{pM} \Delta T_M]}{\Delta h_a} \quad (3)$$

Si el caudal estuviera en exceso, se regula por una válvula de control entre la bomba de agua y el evaporador.

Para el cálculo del área de transferencia (longitud) en el intercambiador de calor se utiliza el método de la diferencia de temperaturas media logarítmica de acuerdo a Ecuación (4). Se fija como parámetros que la tubería interna tendrá un diámetro (D_i) de 50,8 mm y la tubería externa tendrá un diámetro (D_e) de 101,6 mm, asegurando de esta manera que el flujo sea turbulento para ambos fluidos, factor que favorece la transferencia por convección, pero teniendo en cuenta de no generar considerables pérdidas de carga.

Por tratarse de tubos de espesores muy delgados, se toma para el cálculo el valor de diámetro nominal (D_n) de cada tubo ($n=i, e$).

$$L = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{ml} \cdot \pi \cdot D_n} \quad (4)$$

Seguidamente se realiza el cálculo de los coeficientes globales de transferencia para las etapas de evaporación (U_e) y calentamiento (U_c) teniendo en cuenta la velocidad del fluido, y los parámetros que corresponden al mismo. Finalmente se obtienen los valores de longitud de tubería para cada etapa y por consiguiente la longitud total del evaporador.

En la Tabla 2 se indican los valores relativos al cálculo de transferencia de calor para ambas etapas y la longitud total del evaporador.

Tabla 2. Parámetros del Evaporador

Temperatura de entrada del agua	368 K
Temperatura salida del agua	348 K
Temperatura de entrada del GNL	112 K
Temperatura de salida del gas	293 K
Caudal de agua de refrigeración	1,45 kg/s
Caudal de gas	0,099256 kg/s
$U_{\text{Evaporación}}$	308 W/m ² K
$U_{\text{Calentador}}$	232,38 W/m ² K
$L_{\text{Evaporador}}$	12,03 m

6.1. Materiales

Con respecto a los materiales, para la conducción del GNL, se selecciona un acero al carbono con aleación de níquel ASTM A333 Gr.8 que tiene una temperatura de servicio de 73 K, mientras que para el agua de refrigeración se selecciona un acero con bajo contenido de carbono ASTM A105.

7. BOMBA CRIOGÉNICA

Dado que es necesario asegurar el nivel de presión del inyector, se debe elevar la presión del gas. Para eso es necesario la colocación de una bomba criogénica previa entrada al evaporador, para elevar la presión del GNL a la entrada de este equipo, ya que es más seguro elevar la presión de este combustible cuando se encuentra en estado líquido.

La bomba debe ser del tipo reciprocante ya que este tipo de bomba trabaja en el rango de presiones requerido, y se debe alimentar directamente del tanque de almacenamiento del gas líquido.

Para la selección de la bomba se debe tener en cuenta la presión necesaria en el sistema de inyección (30 MPa) y poder garantizar el caudal necesario (13,8 l/min) para mantener los parámetros de potencia y de torque.

8. TIPO Y DISPOSICIÓN DEL TANQUE

Se propone utilizar la configuración de locomotora + tender porta tanque criogénico, para de esta manera intervenir de la menor manera posible sobre la locomotora y optimizar al máximo la autonomía de la formación. De esta manera la locomotora conserva su tanque de combustible para diésel de 6 m³ que podrá ser utilizado como piloto o como combustible principal, dependiendo del requerimiento.

Como la propuesta técnica pretende ser única y satisfacer la necesidad de cualquiera de las líneas férreas de Argentina, el tanque criogénico para el almacenamiento del GNL, deberá ajustarse a los gálibos de acuerdo a G.V.O. 3234/G.V.O.3235/G.V.O.3236.

El tanque criogénico deberá cumplir con los requerimientos de seguridad para el transporte de GNL y con las especificaciones de almacenaje de acuerdo a lo indicado en la normativa vigente según ISO 668:2020, ISO 12991:2012 e ISO 1496:2019.

Para el cálculo de la autonomía se considera un tanque con capacidad de almacenaje de 40 m³.

9. AUTONOMÍA

La autonomía es un parámetro compuesto, debido a que el motor puede funcionar tanto con el sistema dual – donde el GN es el combustible principal y el diésel el piloto – como únicamente con combustible diésel.

Como el combustible piloto, de acuerdo al método de inyección propuesto en 4. – y tomando una relación conservadora – mantiene una proporción 90%-10% GN-diésel (en caudal másico), para el tanque supuesto en 7., la capacidad de combustible diésel de la locomotora presenta un exceso con respecto a la demanda de combustible piloto para el funcionamiento dual. El diésel excedente puede utilizarse para el funcionamiento con ese único combustible.

Bajo esta hipótesis de funcionamiento combinado, se calcula la autonomía bajo la suposición realizada en el punto 5., del máximo caudal a potencia máxima, considerando la densidad estándar del combustible. En el diagrama de la Figura 4 se muestran los valores de autonomía total, considerando la autonomía del funcionamiento dual más la autonomía en diésel remanente.

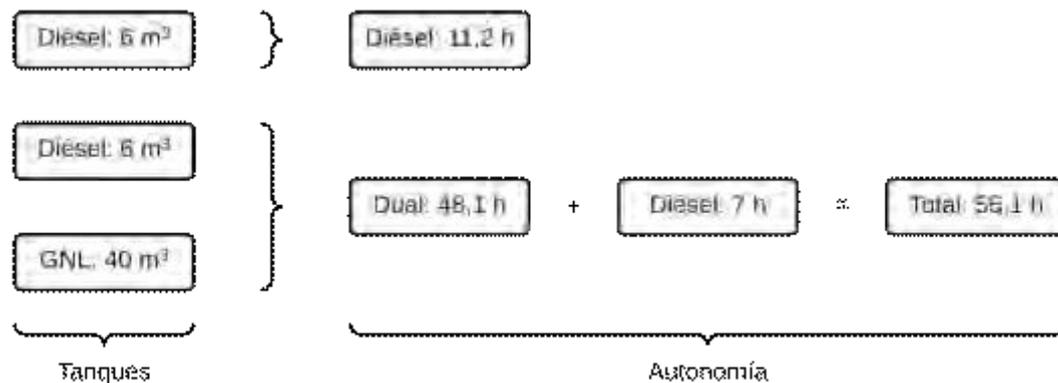


Figura 4: Valores de autonomía total.

10. EMISIONES

Con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el gas natural logra disminuir las emisiones de CO₂ ya que la relación Hidrógeno-Carbono en el gas (25% H - 75% C) es mayor que la del Diésel (13,5% H - 86,5% C). Para los valores de sustitución de combustible diésel planteados, los GEI se pueden disminuir hasta un 25%. Es importante destacar la disminución de CO₂ ya que no existen sistemas de post-tratamiento en el escape para el mismo. Pero no solo las emisiones de CO₂ son menores para este tipo de combustible ya que en el proceso de licuefacción se eliminan componentes que poseen en su estructura azufre, razón por la cual las emisiones de SO_x disminuyen hasta en un 99%. Asimismo, la naturaleza del gas (su combustión tiene lugar en fase gaseosa) permite alcanzar una mezcla más perfecta con el aire de combustión lo que conduce a combustiones completas y más eficientes, con un menor exceso de aire. Al necesitar un menor exceso de aire, el nitrógeno presente en la combustión es menor, produciéndose menor cantidad de NO_x en valores que oscilan entre 60% y un 85%[6-14]. Por otra parte, el gas natural se caracteriza por la ausencia de cualquier tipo de impurezas y residuos, lo que descarta cualquier emisión de partículas sólidas, hollines y humos. Todos estos tipos de emisiones están controladas por la Norma EURO V [11], a excepción del dióxido de carbono.

11. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico del proyecto se realiza una estimación del ahorro que se produce al reemplazar el sistema diésel por el dual, y así obtener una tasa de recupero de la inversión. Para

un abastecimiento de la locomotora con sistema dual solamente son necesarios 2.246 l de Diésel y 40.000 l de GNL. Con dichos valores, la autonomía tiene un valor de 48,1 h. Para una locomotora funcionando sólo con diésel, la cantidad de combustible para el mismo valor de la autonomía (48,1 h) es de 25.770 l.

A partir de precios actuales estimados en USD, en la Figura 5 se aprecia el ahorro producido por una unidad con sistema dual, frente a la misma unidad pero funcionando solo con diésel.

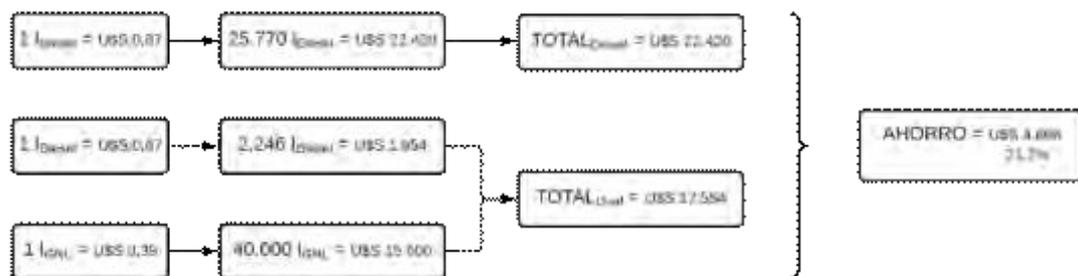


Figura 5: Ahorro del sistema dual frente al diésel en USD.

A partir del valor de ahorro que se obtiene en precios relativos, sería posible amortizar el costo total del equipo en un total de 13 abastecimientos en sistema dual.

12. CONCLUSIÓN

La adaptación de estos motores para funcionar con sistema dual no presenta grandes dificultades debido a que la estructura del motor no se ve modificada, pudiendo funcionar tanto en modalidad dual como en diésel sin ningún tipo de conmutación ni modificación. Solo es necesaria la incorporación de los inyectores para HPDI.

Se deben incorporar equipos extra sobre la locomotora, pero el principal equipo que consiste en un tanque criogénico para el almacenaje y transporte del GNL, se lleva aparte en un tender, sin intervenir sobre la autonomía de fábrica de la locomotora.

Una de las características del GNL es que se almacena a 0,7 MPa a comparación del GNC que es almacenado a 20 MPa representando una ventaja en cuanto a la seguridad en la operación.

A su vez, el gas natural no es tóxico, no es corrosivo y no se inflama fácilmente ya que requiere una temperatura de 600°C para su ignición. Asimismo, la llama no es muy fuerte, no humea y ésta no se extiende. Por otra parte, al ser más liviano que el aire, ante una eventual pérdida, el gas se disipa rápidamente en el aire y se eleva.

Se encuentra que los valores de emisiones son menores que un motor diésel convencional, incluyendo las emisiones de GEI que no se encuentran reguladas por las normativas. Si bien las emisiones de SO_x y de partículas se reducen, es debido a que estas se eliminan en la licuefacción del gas. En cambio, las emisiones de NO_x y de CO₂ se reducen por la operación misma del motor con gas natural, reduciendo así la huella de carbono.

Si bien el motor analizado fue diseñado según la normativa antecedente a la EURO V (bajo normativa EURO IIIA) con el sistema de conversión propuesto el mismo cumple con los requerimientos de emisiones contaminantes para la normativa vigente.

El ahorro obtenido por la utilización de GNL, en un análisis estimativo a valores de mercado presentes, es considerable ya que el costo se reduce un 21,7% en el costo de combustible permitiendo amortizar el sistema de conversión en un total de 13 abastecimientos.

El costo predominante en la conversión corresponde al tanque de GNL que abarcaría un 82% del costo total.

13. TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo parte de una propuesta y análisis realizados con bibliografía y referencias antecedentes y no toma en consideración el estudio del sistema testeado en banco de ensayos o vehículo de prueba. Un trabajo posterior podría consistir en validar experimentalmente la propuesta. Además, y como parte del desarrollo de la aplicación, en la validación sería deseable estudiar un cambio en el aceite de lubricación del motor, con respecto al indicado por el fabricante, como así también estudiar la posibilidad de fatiga térmica en los asientos de válvula.

Otro aspecto a analizar es la factibilidad económica desde el punto de vista de la inversión global, por ejemplo para un ramal en particular, considerando la conversión y ahorro de todo el parque rodante afectado a ese ramal y la instalación de plantas de licuefacción modulares.

14. REFERENCIAS

[1] Schultz J.T., Diesel/Liquid Natural Gas Locomotives: A Dual-Fuel Solution - Era Magazine, Vol.3 (number 6) - energyconversions.com, 1992

[2] Operail converts GE diesel loco to LNG dual-fuel operation. Railway Gazette International, <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/operail-converts-ge-diesel-loco-to-lng-dual-fuel-operation/58445.article?adredir=>, 2021

[3] U.S. Energy Information Administration (EIA). Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: Argentina. The statistical and analytical agency within the U.S. Department of Energy, 2013 -2015

- [4] DECNU-2020-892-APN-PTE (DNU 892/2020). *Plan de promoción de la producción del gas natural argentino - esquema de oferta y demanda 2020-2024*. P.E.N., 2020
- [5] Redacción Econojournal. *Comienzan a circular en el país camiones impulsados por GNL*. Econojournal. <https://econojournal.com.ar/2019/01/comienzan-a-circular-en-el-pais-camiones-impulsados-por-gnl/>, 2019
- [6] Osorio Tejada J., Llera E. y Scarpellini S., *LNG: an alternative fuel for road freight transport in Europe*, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 168, doi:10.2495/SD15021, 2015
- [7] Trenes Argentinos Infraestructura. *Se completó la renovación del material rodante para los trenes de carga*. <https://www.argentina.gob.ar/noticias/se-completo-la-renovacion-del-material-rodante-para-los-trenes-de-carga-0>, 2018
- [8] *CDD6A1 Diesel Locomotive*. <https://www.crrcgc.cc/zyjcen/g11520/s36349/t306341.aspx>. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., LTD.
- [9] Meyers D. P., Bourn G. D., Hedrick J. C., Kubesh J. T. *Evaluation of Six Natural Gas Combustion Systems for LNG Locomotive Applications*. SAE Technical paper 972967, ISSN: 0148-7191, e-ISSN: 2688-3627, 1997
- [10] *Westport HPDI 2.0*, <https://wfsinc.com/our-solutions/hpdi-2.0#section2>, Westport Fuel Systems.
- [11] Resolución 385/2018. *Resoluciones N° 1270/2002 Y 35/2009 – Modificaciones*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. P.E.N., 2018
- [12] Al Ali, M. *Development of Novel Energy Systems for LNG Locomotives*. Faculty of Engineering and Applied Science. University of Ontario Institute of Technology Oshawa, 2015, Ontario, Canada.
- [13] *Diesel engine series for push-pull Train and Locomotives*. MTU Friedrichshafen GmbH I MTU Asia Pte Ltd I MTU America Inc., 2016
- [14] B. Carvalhaes B., de A. Rosa R., de A. D'Agosto A. Mattos Ribeiro, G. *A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive*, Elsevier Ltd., Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 51, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.031>, 2017