

Elección de sistema de tracción para el Sistema Férreo Multipropósito de Antioquia



Revista EIA, ISSN 1794-1237 /
e-ISSN 2463-0950
Año XVII/ Volumen 17/ Edición N.34
Julio-Diciembre de 2020
Reia34025 pág 1-12

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

✉ JUAN DIEGO PINEDA JARAMILLO¹
IVÁN SARMIENTO ORDOSGOITIA²

¹ Departamento de Planeación, Gobernación de Antioquia, Medellín

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Pineda-Jaramillo, J.D.; Sarmiento-Ordosgoitia, I. (2020). Elección de sistema de tracción para el Sistema Férreo Multipropósito de Antioquia. Revista EIA, 17(34), Julio-Diciembre, Reia34025. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1406>

✉ *Autor de correspondencia:*

Pineda Jaramillo, J.D. (Juan Diego):
Departamento de Planeación,
Gobernación de Antioquia,
Medellín. Correo electrónico:
jdpineda@unal.edu.co

Recibido: 30-03-2020
Aceptado: 18-06-2020
Disponible online: 07-12-2020

Resumen

Este artículo presenta un análisis de diferentes alternativas de tracción en ferrocarriles, incluyendo la tracción diésel-eléctrica, tracción a gas natural y tracción eléctrica. Con base en literatura consultada, se presentan las diferentes ventajas y desventajas de cada alternativa de sistemas de tracción, mostrando bajo qué condiciones cada sistema de tracción presenta mayores fortalezas en su aplicación. Así pues, para diversos factores medioambientales y de diversos costos del sistema se presenta la mejor alternativa a utilizar bajo las condiciones del ferrocarril de Antioquia. Se recomienda, finalmente, la utilización de trenes diésel-eléctricos para transporte de mercancías y de residuos sólidos urbanos (RSU), mientras que se recomienda implementar la tracción eléctrica para el tramo en el que se prevé transportar pasajeros, debido al elevado tráfico esperado de este tipo de trenes.

Palabras clave: Tracción diésel-eléctrica, Tracción a gas natural, Tracción eléctrica, Ventajas medioambientales, Comparación económica, Ferrocarril de Antioquia.

Traction system choice for the Multipurpose Railway of Antioquia

Abstract

This paper presents an analysis of different railway traction alternatives, including diesel-electric traction, natural gas traction and electric traction. Based on the reviewed literature, the different advantages and disadvantages of each traction system alternative are presented, showing under which conditions each traction system presents greater strengths in its application. Thus, for various environmental factors and system costs, the best alternative to use under the Antioquia railway conditions is presented. Finally, the use of diesel-electric trains for the freight transport and urban solid waste (MSW) is recommended, while it is recommended to implement electric traction for the section in which passengers are expected to be transported, due to the high expected traffic of this type of train.

Keywords: Diesel-electric traction, Natural gas traction, Electric traction, Environmental advantages, Economic comparison, Antioquia Railway.

1. Introducción

El sector del transporte contribuye enormemente en el consumo energético mundial. Según datos de la Agencia Internacional de la Energía, el consumo energético promedio del sector transporte en el año 2014 fue 2 627.02 Millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe), siendo responsable del 27.87% del total del consumo energético a nivel mundial (International Energy Agency, 2016). En cuanto al tipo de combustible utilizado, existe una fuerte presencia de los productos del petróleo con una cuota del 92.36% del total de los combustibles utilizados presentando un escenario pesimista en el tema medioambiental si no se reduce esta cifra (International Energy Agency, 2016). Frente a esto, es importante declarar que los ferrocarriles son mucho más eficientes en términos de consumo energético que el transporte carretero para transporte de pasajeros y de mercancías (García Álvarez, 2010), (Kim & Chien, 2010), (Kosinski, et al., 2011).

La reducción del consumo energético del tren y de las emisiones asociadas, tanto de gases de efecto invernadero como de otros contaminantes, es una cuestión prioritaria para el ferrocarril. No sólo porque la energía supone una parte importante de sus costos operativos, sino porque en su menor consumo y más bajas emisiones encuentra el ferrocarril una de las más importantes justificaciones de su propia existencia y de las inversiones que se realizan en él, así como de las actuaciones que desde diversos ámbitos se orientan a mover tráficos desde otros modos de transporte menos amigables con el medio ambiente (International Energy Agency, 2016).

La variabilidad del consumo en el ferrocarril obedece a que los trenes son diferentes entre sí en cuanto al tamaño y tipos de tracción (García Álvarez, 2011). Además, las líneas ferroviarias también presentan importantes diferencias, debido a la existencia de distinta severidad en los perfiles, el número de paradas y las velocidades (González Franco, 2012).

Buscando ser económicamente competitivos, muchas estrategias han llevado a reducir el consumo energético en los trenes. Entre esas estrategias, las más relevantes han sido el diseño de trazados ferroviarios con criterios de eficiencia energética, la mejora del material rodante, la aplicación de estrategias de ahorro energético en las operaciones, y la implementación de diferentes tecnologías (Pineda-Jaramillo, et al., 2017), (Pineda-Jaramillo, et al., 2017), (Salvador, et al., 2017). En el campo de las diferencias tecnológicas, es esencial conocer el impacto económico, ambiental y en la operación de las diferentes tecnologías de tracción ferroviaria.

El proyecto de renovación del Ferrocarril de Antioquia busca poner en marcha, nuevamente, la línea que operó durante los últimos años del siglo XIX y gran parte del siglo XX, uniendo los municipios de la Pintada y Puerto Berrío, con el área metropolitana de Medellín como su punto medio. Este proyecto, se ha dividido en tres tramos (tramo 1: desde el municipio de La Pintada hasta el municipio de Caldas; tramo 2: desde el municipio de Caldas hasta el relleno sanitario de la Pradera en el municipio de Don Matías; tramo 3: desde el relleno sanitario de la Pradera en el municipio de Don Matías, hasta el municipio de Puerto Berrío), en donde los tramos 1 y 3 serán exclusivamente para transporte de mercancías, mientras que el tramo 2 se proyecta como un Sistema Férreo Multipropósito (SFM), en el que se transportarán mercancías, pasajeros, y residuos sólidos urbanos (RSU) hasta el relleno sanitario la Pradera, al norte del Valle de Aburrá.

Así pues, este artículo presenta un análisis multi-criterio, incorporando factores ambientales y económicos, de las diferentes alternativas de sistemas de tracción, y buscar la mejor combinación posible para el proyecto de renovación del Ferrocarril de Antioquia. En la sección 2 se presenta el estado del arte de los sistemas de tracción ferroviaria más ampliamente utilizados. En la sección 3 se presentan los resultados de la comparación de distintos sistemas de tracción. En la sección 4 se presentan las generalidades del proyecto de renovación del ferrocarril de Antioquia, a modo de caso de estudio. En la sección 5 se presentan los análisis respectivos del análisis de alternativas de sistemas de tracción para el proyecto de renovación del ferrocarril de Antioquia y se discuten los resultados de la comparación. La sección 6 presenta las conclusiones del estudio y, finalmente, la sección 7 presenta las referencias bibliográficas.

2. Estado del arte de los sistemas de tracción

2.1. Locomotoras Diésel-eléctricas

La locomotora diésel-eléctrica es, de hecho, una locomotora eléctrica cargando su propia planta generadora de electricidad. Las locomotoras realmente son diésel eléctricas donde la salida de un motor de combustión se utiliza para generar energía eléctrica. Esa potencia eléctrica se utiliza para conducir un motor eléctrico para que el tren se mueva.

La aparición de los motores de combustión interna (gasolina y diésel) que se aplicaron a los automotores desde los últimos años del siglo XIX, buscaron sustituir con gran ventaja a las máquinas de vapor. Primero se empleó el motor de gasolina (inventado en 1876) y posteriormente (1897) el de diésel para aumentar potencias. La tracción diésel ha sido vital para el desarrollo del ferrocarril de mercancías en Estados Unidos, mientras que en Europa se ha destinado fundamentalmente a servicios de maniobras y de mercancías en líneas no principales (García Álvarez, 2011).

Actualmente, los motores diésel mueven generadores que alimentan motores de tracción eléctricos (máquinas diésel-eléctricas) con lo que se consiguió un mayor desarrollo de la tracción diésel, al combinar las ventajas del suministro del motor diésel con las de transmisión eléctrica. Además, la tracción diésel presenta una gran flexibilidad para la explotación, ya que puede circular por todo tipo de líneas, con independencia de que estén electrificadas o no (García Álvarez, 2011).

Las máquinas diésel tienen un rendimiento energético bajo, aproximadamente del 30%, lo que significa que, de 100 litros de combustible, más de 70 litros se transforman en calor y contaminantes (Zhang, 2015), dependen totalmente del petróleo y tienen un nivel alto de emisiones y de contaminaciones locales (García Álvarez, 2011).

Las emisiones del diésel consisten en NO_x, CO_x, SO_x, hidrocarburo (HC), material orgánico volátil (VOC) y material particulado (PM_x). Las emisiones de CO₂ de los vehículos diésel varían con el tipo de tecnología y nivel de potencia. Cabe destacar que uno de los temas más importantes es contar con la posibilidad de recuperar energía de los eventos de frenado, imposible en la tracción diésel (Read, et al., 2011), (Sun, et al., 2014).

2.2. Locomotoras a Gas Natural

El gas natural es un combustible fósil no renovable (García Álvarez, 2011), el cual no es sostenible, pero puede ser utilizado para sustituir el petróleo, siendo después de éste y el carbón la tercera fuente de energía en el mundo. El gas natural es un gas hidrocarbonado producto de la mezcla de metano (contaminante principal), dióxido de carbono y nitrógeno. Según la explotación del gas sea asociado a la explotación de petróleo o no, el gas natural puede tener menor (60-80%) o mayor porcentaje

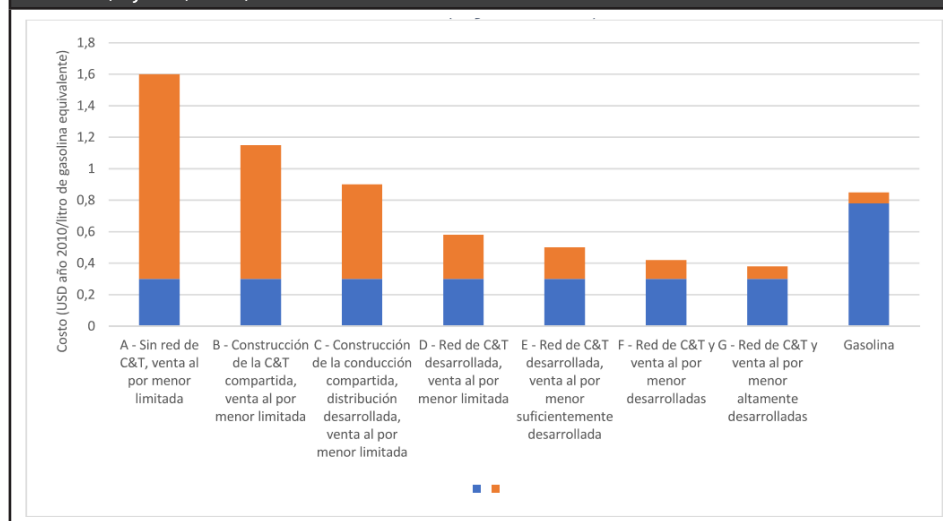
(95-98%) de metano, respectivamente. Los otros componentes en menores cantidades son el etano, butano, pentano, dióxido de carbono, nitrógeno, ácido sulfhídrico y trazas. El gas debe ser tratado para eliminar impurezas y cumplir estándares.

El gas natural vehicular se utiliza en dos formas: Gas Natural Licuado (GNL) y el Gas Natural Comprimido (GNC). El GNC es más liviano que el aire el cuál es almacenado con alta presión alrededor de 20 a 32 MPa (Hai, 1993). Se requiere un tanque robusto para almacenamiento que ocupa un espacio adicional en el vehículo (al igual que en los trenes de tracción diésel).

El precio del gas natural está influenciado por la extracción o producción, el desarrollo de la red y la distribución. La competitividad del gas natural es más alta donde existe un alto nivel de desarrollo de la infraestructura para su conducción y transmisión (C&T) (Schulte, 2004). La **Figura 1** presenta un estimado del costo del gas natural basado en el nivel de infraestructura existente (Nijboer, 2010).

Figura 1. Costo del gas natural según desarrollo de su infraestructura de conducción y distribución.

Fuente: (Nijboer, 2010).



Las emisiones, al igual que en la tracción diésel, varían con el tipo de tecnología y nivel de potencia (Read, et al., 2011), (Sun, et al., 2014).

2.2.1. Gas Natural Licuado como combustible para el transporte

El GNL tiene el doble de densidad de energía que el GNC. El GNL debe almacenarse en tanques especialmente diseñados con temperatura fría (-165 °C) y a bajas presiones (70 – 150 psi) (Announcements, 1983). Debido a la alta densidad de energía del GNL, el reabastecimiento de combustible es relativamente más económico. Los beneficios del uso del GNL incluyen: mejorar la calidad del aire, mejorar la seguridad energética y menores costos operativos. El GNL es mundialmente reconocido como una de las mejores alternativas de combustible para vehículos. Aunque el GNL es energía no renovable, se han desarrollado varias tecnologías para producir gas “bionatural”. Además, la distribución de combustible, la red de transmisión, el almacenamiento de combustible y el llenado de combustible podrían limitar el desarrollo de vehículos a gas natural (Nijboer, 2010).

2.2.2. Gas natural como combustible en ferrocarriles

Miembros de comunidades reguladoras, comunidades de suministro de motores y comunidades de suministro de combustible creen que los ferrocarriles tienen la oportunidad de utilizar el gas natural como combustible para ayudar a cumplir las metas de emisiones y rendimiento. Excepto por algunas posibles aplicaciones específicas, los investigadores ferroviarios no están de acuerdo. Décadas de investigación y desarrollo y demostraciones de prototipos de locomotoras han proporcionado a los ferrocarriles una gran cantidad de información sobre la practicidad del uso de locomotoras alimentadas con gas natural (BNSF Railway Company, Union Pacific Railroad Company, The Association of American Railroads, California Environmental Associates, 2007).

De las investigaciones desarrolladas en el último siglo en la tracción de gas natural, los investigadores están firmemente en contra de que los ferrocarriles sean empujados hacia el uso de locomotoras impulsadas por el gas natural. Estas son algunas de las razones por las cuales no están de acuerdo con la tracción a gas natural (Friedemann, 2017):

1. Los ferrocarriles han experimentado con combustibles alternativos desde 1935 y no han funcionado.
2. Las emisiones de gas natural son peores que las emisiones de una locomotora diésel moderna.
3. Las locomotoras de GNL son más caras que los equipos diésel para operar, y se necesita una infraestructura de combustible completamente nueva.
4. Dado a que solo se vende una locomotora por cada 211 camiones Clase 8 en Estados Unidos es poco probable que los fabricantes hagan investigación suficiente para la fabricación en masa de locomotoras de GNL.
5. Las locomotoras de GNL no tienen suficiente potencia
6. En un descarrilamiento o accidente, el GNL es mucho más peligroso que el diésel.

En Estados Unidos, país líder en el uso de transporte de mercancías por ferrocarril, se estima que la producción de gas natural disminuirá a una tasa alarmante, y existen pocas terminales de importación de Gas Natural Licuado. Por esto, la construcción e implementación de locomotoras de GNL no es práctico (Friedemann, 2017).

2.3. Locomotoras eléctricas

Las locomotoras eléctricas son alimentadas por una fuente externa de energía eléctrica. La fuente externa puede ser catenaria, tercer riel, o por medio de un dispositivo de almacenamiento a bordo.

Estas locomotoras tienen ausencia de polución por parte de la locomotora en sí misma, además de contar con mejores prestaciones, menores costos de mantenimiento, y menor costo de la energía eléctrica para las locomotoras.

Las emisiones varían según la fuente de electricidad (carbón, nuclear, gas natural, hidroeléctrica, viento, solar) y estas emisiones son deslocalizadas por tener los ferrocarriles una infraestructura lineal.

Para poder llevar a cabo la alimentación, existe una red de subestaciones de tracción que se encargan de transformar y rectificar la alta tensión alterna de suministro en valores de tensión en los que puede ser distribuida al sistema de catenaria o tercer carril.

Existe un consenso general sobre las ventajas energéticas del tren en comparación con el uso del vehículo privado o del camión, e incluso en comparación con otros modos colectivos de transporte de viajeros. Las razones de esta superioridad del

ferrocarril están basadas en el tamaño del tren y en la posibilidad de utilizar energía eléctrica, con mayor rendimiento y con el potencial de reducir emisiones (Insa Franco, et al., 2016).

Las locomotoras eléctricas se desarrollaron desde finales del siglo XIX (1879), ofreciendo enormes ventajas en cuanto a limpieza, potencia, eficiencia, etc., frente a otros sistemas de tracción. Sin embargo, al requerirse unos mayores costos de inversión iniciales de instalación (catenaria, subestaciones que reciben la energía de la red, adquisición de material motor más sofisticado) solamente es económicamente interesante la electrificación a partir de cierto nivel de tráfico, ya que el costo variable es menor en tracción eléctrica, pero exige un costo fijo mayor que otras opciones (García Álvarez, 2011).

3. Resultados de la comparación de sistemas de tracción

3.1. Diferencias ambientales

3.1.1. Comparación medioambiental entre tracción diésel-eléctrica y tracción a gas natural

En la actualidad, existe una locomotora de gas natural probada y comercialmente disponible para el mercado en Estados Unidos. Está disponible sólo como un producto de actualización o conversión. Este producto patentado convierte una locomotora diésel EMD645-E3 de 3000 HP, de aproximadamente 25 años, para funcionar con gas natural. La comparación de las emisiones de esta locomotora convertida a gas natural con las locomotoras diésel certificadas muestra que las nuevas locomotoras diésel superan a las locomotoras alimentadas con gas natural en las emisiones (ver **Tabla 1**) (BNSF Railway Company, Union Pacific Railroad Company, The Association of American Railroads, California Environmental Associates, 2007).

TABLA 1. COMPARACIÓN DE LA LOCOMOTORA DE TRANSPORTE DE LÍNEA CON COMBUSTIBLE A GAS NATURAL Y LOCOMOTORAS DIÉSEL DE RECORRIDO CERTIFICADAS.
FUENTE: (BNSF RAILWAY COMPANY, UNION PACIFIC RAILROAD COMPANY, THE ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS, CALIFORNIA ENVIRONMENTAL ASSOCIATES, 2007).

Modo	THC	NMHC	CO	NOx	PM
ECl conversión a Gas Natural	7.55	1.17	10.0	5.2	0.38
Diesel Tier 2 compliant EMD	0.22	0.22	1.0	5.1	0.07
Diesel Tier 2 compliant GE	0.16	0.16	0.4	5.3	0.10

De la **Tabla 1** se observa que no hay beneficio de NOx en el uso de la locomotora con gas natural, y las demás emisiones de contaminantes son más altas que en los trenes con tecnología diésel modernos.

3.1.2. Comparación medioambiental entre tracción eléctrica y tracción diésel-eléctrica

La demanda de energía primaria de origen fósil con tracción eléctrica es del orden de un 45% inferior a la tracción diésel, y las emisiones de CO2 son inferiores en un 59%. Si además se tiene en cuenta el uso del freno regenerativo (aplicable únicamente en tracción eléctrica), la reducción pasa a ser del 54% y del 65%, respectivamente.

Entre las ventajas que tiene la tracción eléctrica frente a los otros sistemas de tracción (García Álvarez, 2011), se tienen:

- Reducción de las emisiones de CO₂, la contribución de agotamiento de las energías no renovables. Además, se reducen los costos operativos y por ello se hace más competitivo el ferrocarril frente a otros modos de transporte.
- Los trenes eléctricos son más silenciosos que los trenes de tracción diésel o de gas.
- La mejora de las velocidades que permiten los trenes eléctricos reduce indirectamente los costos operativos, haciendo más atractivo el sistema para los pasajeros.

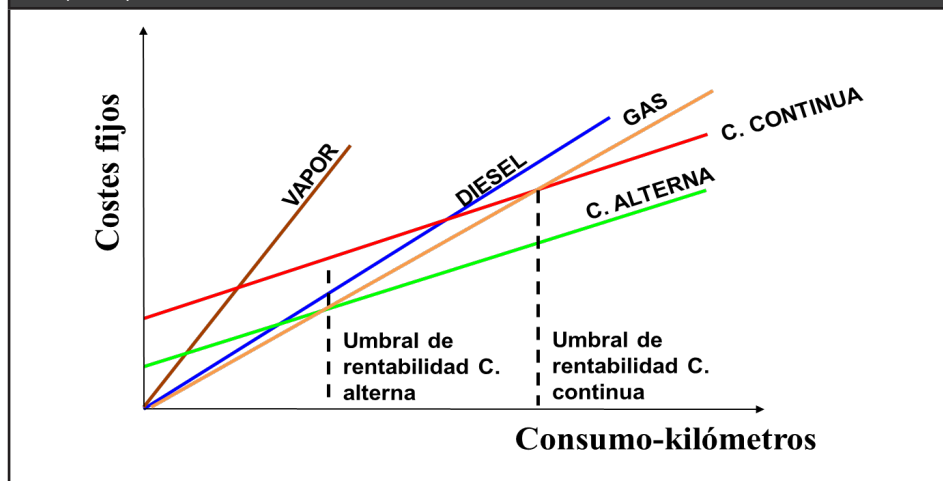
Costo del gas natural según desarrollo de su infraestructura

La rentabilidad de la electrificación para una empresa ferroviaria integrada (responsable de las inversiones en la construcción de la infraestructura, del mantenimiento y de la operación de la línea) se alcanza a partir de un cierto umbral de tráfico (García Álvarez, 2011). Andrés López Pita (López Pita, 2008) describe este sistema de cálculo clásico, presentando unos valores de referencia, además de presentar la **Figura 2** donde se ilustra el punto a partir del cual es rentable la electrificación según cierto umbral de tráfico.

Si bien la **Figura 2** representa a grandes rasgos la reducción de costos fijos según el consumo-km dependiendo del umbral de tráfico para diversos sistemas de tracción, es importante mencionar que esta metodología tradicional debe de considerar los costos globales del sistema, incluyendo los costos de inversión, de mantenimiento y de operación, sin importar el número de empresas involucradas en estos aspectos.

Figura 2. Rentabilidad de electrificación según cierto umbral de tráfico.

Fuente: Elaboración propia a partir de (García Álvarez, 2011), (López Pita, 2008), (Insa Franco, et al., 2016).



4. Renovación del Ferrocarril de Antioquia

En el año 2016 se constituye una sociedad entre entidades públicas, bajo la forma de sociedad por acciones simplificada, denominada Promotora Ferrocarril de Antioquia S.A.S., descentralizada por servicios, del orden departamental en Antioquia, con la autonomía administrativa y financiera, propia de las empresas industriales y comerciales del Estado. El objeto social de la sociedad Promotora Ferrocarril de Antioquia S.A.S. es promover, estructurar y gestionar la realización de los estudios de prefactibilidad, factibilidad, conveniencia técnica, económica o social y/o todos los necesarios tendientes a la reactivación del Sistema Férreo en Antioquia y su integración al sistema Férreo Nacional (Promotora Ferrocarril de Antioquia, 2017).

El proyecto de renovación del Ferrocarril de Antioquia busca poner en marcha una línea ferroviaria de aproximadamente 305 km entre los municipios de la Pintada (al sur del departamento de Antioquia) hasta el municipio de Puerto Berrío (al oriente del mismo departamento, pasando por el Valle de Aburrá).

Este proyecto, se ha dividido en tres tramos a saber (**Figura 3**):

- tramo 1: desde el municipio de La Pintada hasta el municipio de Caldas (99.7 km);
- tramo 2: desde el municipio de Caldas hasta el relleno sanitario de la Pradera en el municipio de Don Matías (76.9 km); y el
- tramo 3: desde el relleno sanitario de la Pradera en el municipio de Don Matías, hasta el municipio de Puerto Berrío) (128.4 km)

En el año 2017, el Consorcio Ferrocarril de Antioquia 2017, sociedad conformada por las empresas italiana Progin S.P.A, portuguesa COBA y colombiana CIP S.A.S., resultó adjudicada para la realización del estudio de la estructuración de la solución técnica, económica, legal, predial, social y ambiental para la reactivación del ferrocarril de Antioquia entre el municipio de la Pintada y el municipio de Puerto Berrío. En este estudio se realizó una estimación de la demanda que tendría el sistema en cada uno de sus tres tramos, analizando por separado la demanda de pasajeros, mercancías y RSU (Consorcio Ferrocarril de Antioquia 2017 – CFA2017, 2018).

Con base en estos resultados, se determinó que los tramos 1 y 3 serían exclusivamente para transporte de mercancías, mientras que el tramo 2 se proyectaría como un Sistema Férreo Multipropósito (SFM). En este tramo 2 se transportarán inicialmente pasajeros (entre los municipio de Caldas y Barbosa) y RSU desde el sector de Caribe (al norte del municipio de Medellín) hasta el relleno sanitario la Pradera, al norte del Valle de Aburrá; y en una segunda fase, una vez entre en funcionamiento el tramo 3, también podría transitar por allí mercancías.

Dentro del modelo de operación, se estudió la frecuencia de paso de trenes necesaria para satisfacer:

- la demanda de pasajeros en tramo 2 entre los municipios de Caldas y de Barbosa,
- la demanda de RSU en el tramo 2 entre el sector Caribe (norte de Medellín) y el relleno sanitario de la Pradera (municipio de Don Matías, al norte del Valle de Aburrá)
- la demanda de mercancías en los tres tramos, que variará con base en los tramos que estén construidos en su momento

Para el transporte de pasajeros, se generaron diferentes escenarios de operación para los trenes de pasajeros, donde la frecuencia de paso de trenes varía entre 8 y 30 minutos, dependiendo del día y de la franja horaria.

Para el transporte de los RSU, se generaron varios escenarios donde solamente habría cuatro viajes de ida y vuelta entre el sector de Caribe y el relleno sanitario de la Pradera al día.

Para el transporte de mercancías, los diferentes escenarios de operación estiman el paso de entre 2 y 4 viajes de ida y vuelta que varía según los tramos que estén rehabilitados en su momento, presentando una muy baja frecuencia principalmente en los tramos 1 y 3, en los que solamente habría tránsito de este tipo de trenes.

Figura 3. Localización del proyecto en el departamento de Antioquia y sus tres tramos.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Consortio Ferrocarril de Antioquia 2017 – CFA2017, 2018)



5. Análisis y discusión

Mediante la comparación económica de la inversión con el valor actual neto de los ahorros de costos de explotación que supone la electrificación, se toma la decisión de electrificar o no una línea ferroviaria. En general, la electrificación requiere una inversión inicial (subestaciones y catenaria) y, posteriormente produce unos costos menores de explotación, ya que el costo económico de la energía consumida es menor en tracción eléctrica, al igual que el costo de mantenimiento de las máquinas. Esta reducción de costos corrientes compensa el costo de mantenimiento de la electrificación (García Álvarez, 2011). En la **Tabla 2** se presenta una comparación de costos y otros factores entre los sistemas de tracción evaluados. Se puede observar que de 18 aspectos, la tracción eléctrica tiene 13 positivos (72%), mientras que las otras opciones tienen sólo 6 positivas (33%).

Considerando los valores presentados en la **Tabla 2**, y la descripción de la operación del proyecto ferrocarril de Antioquia presentado en la sección 4, la mejor alternativa de sistema de tracción es electrificar la línea en el tramo 2 debido a que la frecuencia de paso de trenes es alta, mientras que los tramos 1 y 3, al tener un paso de tren tan bajo, lo mejor es que el transporte de mercancías se realice mediante el uso de locomotoras diésel-eléctricas.

Es de anotar que los trenes de tracción diésel-eléctrica pueden transitar sobre una vía electrificada sin inconveniente alguno, por lo que no habría problema que un tren de tracción diésel-eléctrica para transporte de mercancías que tenga por origen el municipio de la Pintada y como destino el municipio de Puerto Berrío cruce un tramo 2 electrificado.

Asimismo, el transporte de RSU se podría realizar igualmente utilizando locomotoras de tracción diésel-eléctricas sin problema alguno con la electrificación del tramo 2.

TABLA 2. COMPARACIÓN DE DIFERENTES FACTORES ENTRE LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN EVALUADOS.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE (GARCÍA ÁLVAREZ, 2011), (INSA FRANCO, ET AL., 2016), (LÓPEZ PITA, 2008), (GARCÍA ÁLVAREZ, 2008), (GARCÍA ÁLVAREZ, 2009), (GARCÍA ÁLVAREZ, 2009), (ZHANG, 2015)

*: VENTAJA DEL SISTEMA DE TRACCIÓN FRENTE A LOS DEMÁS.

Concepto	Tracción eléctrica	Tracción diésel-eléctrica	Tracción a gas natural
Inversión en instalaciones fijas	Mayor*	Nula	Nula
Inversión en material rodante	Ligeramente mayor	Ligeramente menor*	Ligeramente menor*
Costo de mantenimiento de instalaciones	Bajo	Nulo*	Nulo*
Costo de mantenimiento del material rodante	Menor*	Mayor	Mayor
Costo de la energía	Normalmente menor*	Normalmente mayor	Normalmente mayor
Costo total en la construcción	Mayor	Menor*	Menor*
Costo total en la operación	Menor*	Mayor	Mayor
Costo económico para el sistema ferroviario	Menor*	Mayor	Mayor
Costo de inversión inicial	Mayor	Menor*	Menor*
Rendimiento de la potencia suministrada	80%-90%*	30%	30%-40%
Ruido y vibraciones	Menor*	Mayor	Mayor
Emisiones	Deslocalizadas*	In situ	In situ
Cantidad de locomotoras para una misma potencia	Menor*	Mayor	Mayor
Consumo energético	Menor*	Normalmente mayor	Normalmente mayor
Impacto ambiental	Menor*	Mayor	Mayor
Avería en instalaciones eléctricas	Existentes	Nulo*	Nulo*
Peso extra de su propio combustible	Nulo*	Si	Si
Aceleración y frenado	Suave*	Brusco	Brusco

6. Conclusiones

La tracción eléctrica es superior en rendimiento, comodidad e impactos externos, pero requiere una inversión más alta. Sin embargo, para líneas ferroviarias congestionadas (con alta frecuencia de paso de trenes), esta inversión inicial es económicamente viable a partir de cierto nivel de tráfico, ya que el costo variable es menor, pero exige un costo fijo.

Los trenes de tracción diésel-eléctrica son superiores para líneas secundarias y de poco tráfico como las líneas de transporte de mercancías.

Al año 2017 las locomotoras con tracción a gas natural no están completamente desarrolladas, y no se implementa más que en casos específicos de maniobras en talleres, mostrando la novedad de este sistema y lo poco estudiado. Esto demuestra una gran desventaja en cuanto a la implantación de una tecnología tan novedosa que

aún no se conoce a ciencia cierta su rendimiento y, probablemente, requiera ajustes en su operación.

Para el caso del Ferrocarril de Antioquia, es posible utilizar trenes de tracción diésel-eléctrica para transporte de mercancías y de RSU. Pero para el tramo 2 (entre Caldas y Barbosa), donde se prevé transportar pasajeros, lo más recomendable será la implementación de tracción eléctrica para alimentar un tráfico elevado de trenes para transportar a estos viajeros.

Debe de considerarse la escasa infraestructura de conducción y transmisión del gas natural en Antioquia, lo que influiría en elevados costos si se eligiera ese sistema de tracción.

Referencias

- Announcements, 1983. Transport and storage of LPG and LNG. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volumen 12, p. 191.
- BNSF Railway Company, Union Pacific Railroad Company, The Association of American Railroads, California Environmental Associates, 2007. *An Evaluation of Natural Gas-fueled Locomotives*, Los Angeles: s.n.
- Consorcio Ferrocarril de Antioquia 2017 – CFA2017, 2018. *Estructuración de la solución técnica, económica, legal, predial, social y ambiental para la reactivación del ferrocarril de Antioquia como tren multipropósito entre el municipio de la Pintada y el municipio de Puerto Berrío*, Medellín: s.n.
- Friedemann, A., 2017. *Energyskeptic*. [En línea]
Available at: <http://energyskeptic.com/2017/can-railroad-locomotives-run-on-lng/>
[Último acceso: 15 Diciembre 2017].
- García Álvarez, A., 2008. Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad. En: *La importancia de la velocidad en el ferrocarril*. Córdoba: Fundación Caminos de Hierro.
- García Álvarez, A., 2009. Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diésel en el ferrocarril. *Anales de Mecánica y Electricidad*, 86(1), pp. 53-66.
- García Álvarez, A., 2009. La electrificación ferroviaria cada vez más necesaria y eficiente. *Anales de Mecánica y Electricidad*, 86(3), pp. 8-15.
- García Álvarez, A., 2010. *High speed, energy consumption and emissions*, Madrid: Study and Research Group for Railway Energy and emissions.
- García Álvarez, A., 2011. *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- González Franco, I., 2012. *Estimación del consumo de energía y emisiones de CO2 en trenes de mercancías y análisis de la variabilidad*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Hai, L., 1993. *Heat transfer model applicable to the refuelling process for natural gas*, Melbourne: s.n.
- Insa Franco, R. y otros, 2016. *Monitorización, modelización y simulación del consumo energético en el ferrocarril*. Valencia: Editorial UPV.
- International Energy Agency, 2010. *The contribution of natural gas vehicles to sustainable transport*, París: IEA Energy Papers. OECD Publishing.
- International Energy Agency, 2016. *Key World Energy STATISTICS*. s.l.:s.n.
- Kim, K. & Chien, S. I., 2010. Optimal train operation for minimum energy consumption considering schedule adherence. *TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board*.
- Kosinski, A., Schipper, L. & Deakin, E., 2011. Analysis of high-speed rail's potential to reduce CO2 emissions from transportation in the United States. *TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board*.
- López Pita, A., 2008. *Explotación de líneas de ferrocarril*. Barcelona: Ediciones UPC.

- Pineda-Jaramillo, J. D., Insa, R. & Martínez, P., 2017. Modeling the energy consumption of trains by applying neural networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(3), pp. 816-823.
- Pineda-Jaramillo, J. D., Salvador, P. & Insa, R., 2017. Comparing energy consumption for rail transit routes through Symmetric Vertical Sinusoid Alignments (SVSA), and applying artificial neural networks. A case study of Metro Valencia (Spain). *DYNA*, 84(203), pp. 17-23.
- Promotora Ferrocarril de Antioquia, 2017. *Consultoría especializada para la estructuración de la solución para la reactivación del ferrocarril en Antioquia como tren mltipropósito entre La Pintada y Puerto Berrío - Anexo 4*, Medellín: s.n.
- Read, M., Griffiths, C. & Smith, R., 2011. The effect of driving strategy on hybrid regional diesel trains. *Journal of Rail and Rapid Transit*, Volumen 225, pp. 236-244.
- Salvador, P., Martínez, P., Villalba, I. & Insa, R., 2017. Modelling energy consumption in diesel multiple units. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*.
- Schulte, I., 2004. Issues affecting the acceptance of hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(7), pp. 677-685.
- Sun, Y., Cole, C., Spiriyagin, M. & al, e., 2014. Longitudinal heavy haul train simulations and energy analysis for typical Australian track routes. *Journal of Rail and Rapid Transit*, Volumen 228, pp. 355-366.
- Zhang, T., 2015. *Possibilities of alternative vehicle fuels - A literature review*, Gävle: s.n.