

**EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN PARA LOS TRENES DE
CERCANÍA DEL VALLE DE ABURRÁ**

DIEGO ALEJANDRO VILLA LÓPEZ

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL
BRAVO FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA
ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2023**

Contenido

1. Planteamiento del problema	2
1.1 Descripción	2
1.2 Formulación	3
2. Justificación	3
3. Objetivos	4
3.1 Objetivo general	4
3.2 Objetivos específicos	5
4. Marco teórico	5
Necesidad del proyecto	5
4.1. Sistemas de tracción	6
4.1.1 Locomotoras diésel	6
4.1.2 Locomotoras a gas natural	8
4.1.3 Locomotoras eléctricas	8
4.2. Sistemas de trenes de los principales países del mundo	10
4.3. Características de trenes nuevos y más especiales del mundo	12
4.3.1 RENFE SERIE S – 730 (hibrido)	12
4.3.2 TALGO AVRIL	13
4.3.2 TREN MAGLEV	14
5. Metodología	14
5.1 Resultados de la comparación de los sistemas de tracción	15
5.1 Diferencias Ambientales	15
5.1.1 Comparación medioambiental entre tracción diésel-eléctrica y tracción a gas natural	15
5.1.2 Comparación medioambiental entre tracción eléctrica y tracción diésel-eléctrica	16
5.2 Diferencias Económicas	16
7. Análisis, resultados y recomendaciones	22
8. Cronograma	23
9. Presupuesto	24
10. Referencias Bibliográficas	25

Ilustración 1 RENFIE S-730	13
Ilustración 2. Características técnicas RENFE Serie S – 730	13
Ilustración 3. Prototipos TALGO G3 y G4	14
Ilustración 4. Tren MAGLEV	14
Ilustración 5. Comparación de la locomotora de transporte de línea con combustible a gas natural y locomotoras diésel	15
Ilustración 6. Rentabilidad de electrificación según cierto umbral de tráfico	17
Ilustración 7. Valor de los costos comparativa entre alternativa Diesel y eléctrica	18

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

La movilidad en Medellín y en general en todo Antioquia cada día se hace más difícil, diariamente tanto los ciudadanos, así como los diferentes empresarios, se enfrentan con una serie de situaciones las cuales no les permite cumplir a cabalidad con el objetivo de tener un viaje tranquilo y sin retardos hacia su destino o en la entrega de sus bienes.

Existen factores que dificultan el funcionamiento adecuado del servicio de transporte; por un lado, el pésimo estado de la malla vial para acceder a la ciudad y de igual forma la congestión en el centro de la ciudad, producto de una deficiente planeación de tráfico y una demora en la rehabilitación de las vías, sumado a esto el evidente crecimiento automotor de tractomulas, camiones, buses, motocicletas.

Para mitigar, el impacto que genera la pésima movilidad, que afecta no solo a la ciudad, sino a la Región se presentó una propuesta de asociación público - privada para llevar a cabo un proyecto de tren de cercanías, este proyecto 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. Este proyecto consiste en presentar un análisis completo que involucre múltiples criterios, teniendo en cuenta tanto los factores técnicos de las diferentes alternativas de tracción en trenes, incluyendo la tracción eléctrica con diferentes tipos de motores y controladores.

1.2 Formulación

¿Cómo seleccionar la mejor alternativa de tracción en trenes, incluyendo la tracción eléctrica con diferentes tipos de motores y controladores, que permita prestar un servicio eficiente, rentable y sostenible en el tiempo?

2. Justificación

Cada día la movilidad en el área metropolitana está siendo más caótica. Existen una serie de factores que hacen que la problemática sea cada vez mayor como lo son el pésimo estado de la malla vial, la falta de una adecuada planeación en el mantenimiento de las vías, el permanente crecimiento de vehículos y motos que circulan en la ciudad y sus alrededores y la demora en el desarrollo de la interconexión de la malla vial.

Sumado a esto la necesidad de ser económicamente competitivos y poder entregar los bienes y servicios producidos en nuestra región de una forma más oportuna y menos costosa.

Debido a esto, se propone la construcción del tren de cercanías como un medio de transporte en un sistema no contaminante que reduzca los tiempos de espera y de viaje, por tanto es importante poder proporcionar un estudio que permita la selección de una propuestas de sistema de tracción para las locomotoras del tren de cercanías del valle del Aburra mediante la comparación de los parámetros presentados en las fichas técnicas y así poder escoger la mejor opción en términos de eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Presentar un análisis técnico de las diferentes alternativas de tracción en trenes, que permita seleccionar la mejor alternativa para el proyecto Trenes de cercanía del Valle de Aburrá.

3.2 Objetivos específicos

Caracterizar el sistema de tracción de las unidades que se necesitan para el tren de cercanías del valle del aburra mediante la definición de las condiciones de operación demandadas.

Realizar un estudio detallado de tres de los sistemas de tracción existentes en el mercado mundial mediante la revisión de sus fichas técnicas y características.

Entregar un informe con recomendaciones para la adopción de un sistema de tracción para los trenes de cercanía del Valle de Aburrá.

4. Marco teórico

Necesidad del proyecto

Proponer la solución óptima del sistema de tracción para el transporte ferroviario para el Tren de cercanía del Valle de Aburrá.

Tabla 1. Sectorización del corredor férreo (propia a partir de Estudio de prefactibilidad tramo 3)

N. Tramo	Tramo	Longitud en Km
1	La Pintada- La Primavera (Caldas)	121
2	La Primavera (Caldas)- Estación Botero (Santo Domingo)	83
3	Estación Botero (Santo Domingo)- Puerto Berrio	128

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, 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 municipios 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.

4.1. Sistemas de tracción

4.1.1 Locomotoras diésel

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 las máquinas de vapor. Primero se empleó el motor de gasolina (inventado en 1876) y posteriormente (1897) el de diésel para aumentar potencias.

Existen tres tipos de tracción diésel:

- Diésel-hidráulica: uno o varios motores diésel accionan los ejes. La transmisión es generalmente por turbinas hidráulicas. (García, 2016)
- Diésel-eléctrica: un motor diésel mueve un generador eléctrico que, directamente o mediante un rectificador alimenta el o los convertidores y el o los motores eléctricos de tracción. A estos últimos se les denomina generalmente motores de tracción para diferenciarlos del motor diésel del generador eléctrico. La mayoría de las locomotoras pesadas diésel desde los años 1960 son diésel-eléctricas. (García, 2016)
- Dual, híbrida, o eléctrico-diésel: existen dos fuentes alternativas de energía: (1) corriente eléctrica externa o (2) un motor diésel que actúa como grupo electrógeno. La tracción dual puede considerarse como una tracción diésel-eléctrica en la que en tramos electrificados se puede prescindir del grupo electrógeno diésel. La disminución del peso de los equipos de tracción debido a los avances en la electrónica de potencia y de los motores, permite cada vez más abordar esta alternativa, especialmente interesante para redes parcialmente electrificadas y para tráfico en terminales de mercancías. (García, 2016)

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. (Alvarez, 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. (Alvarez, 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. (Alvarez, 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).

4.1.2 Locomotoras a gas natural

El gas natural es un combustible fósil no renovable 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. 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, 2001)

Las emisiones, al igual que en la tracción diésel, varían con el tipo de tecnología y nivel de potencia de la red.

4.1.3 Locomotoras eléctricas

Las locomotoras eléctricas son alimentadas por una fuente externa de energía eléctrica.

Los sistemas de electrificación están clasificados de acuerdo con tres parámetros básicos:

- Tensión eléctrica
- Tipo de corriente: Corriente continua (DC) o Corriente alterna (AC) con frecuencia monofásica (por defecto) o multifásica.
- Sistema de alimentación: Que determina como se alimentan eléctricamente las unidades de tracción. Existen dos tipos fundamentales: (riel conductor y Línea Aérea de Contacto, denominada catenaria).

La fuente externa puede ser catenaria, tercer riel, o por medio de un dispositivo de almacenamiento a bordo y alimenta directamente o mediante transformadores o convertidores (los más recientes con tecnología IGBT) a los motores de tracción eléctricos. 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. (Schulte, 2001)

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. (Alvarez, 2011)

Líneas de transporte

Las líneas de transporte se encargan de transportar y distribuir la potencia producida en las centrales eléctricas a las subestaciones de tracción ferroviaria. De forma generalizada, transportan grandes potencias en corriente alterna. Además, para evitar pérdidas por efecto Joule, se aumenta las tensiones mediante transformadores después de su generación y antes de su transporte.

Las líneas eléctricas de transporte pueden clasificarse del siguiente modo: (Bellot, 2019)

- Primera categoría: Tensión nominal superior a 66 kV.
- Segunda categoría: tensión nominal comprendida entre 30 y 66 kV.
- Tercera categoría: tensión nominal inferior a 30 kV, e igual o superior a 1 kV.

Tensión de alimentación

El ferrocarril se alimentaba en corriente continua con tensión entre 600 y 1.500V debido a la facilidad que daba el uso de los motores de corriente continua. Pero con el aumento de las velocidades, fue necesario pasar a corriente alterna, aumentando así las tensiones, menores caídas de tensión, reduciendo las pérdidas y usando catenarias más ligeras.

4.2. Sistemas de trenes de los principales países del mundo

ESTADOS UNIDOS: Con base en los datos que ofrece la CIA, la red ferroviaria estadounidense es en la actualidad, la más extensa del mundo. Los 293,564 kilómetros que recorren el país son operados por organizaciones privadas como Union Pacific Railroad y BNSF Railway para mercancías, mientras que en el transporte de pasajeros domina la compañía nacional Amtrak. Se estima que las líneas de ferrocarril que son dedicadas para transportar las materias primas y bienes representan casi el 80% de todo el kilometraje estadounidense, mientras que la red de pasajeros tiene una extensión de 35.000 kilómetros. (Flores, 2021)

CHINA: ocupa el segundo puesto en extensión con sus 131.000 kilómetros de vía y lidera la alta velocidad con sus 35.000 kilómetros conectando más de 300 ciudades de todo el país. (Flores, 2021) La extensa red, operada por la empresa estatal, transporta más de 2 mil millones de pasajeros (posicionándose segundo en el mundo después de la India) y 3 mil millones de toneladas de mercancías (alcanzando el segundo puesto mundial tan sólo superado por los Estados Unidos). El ferrocarril es el principal modo de transporte en China. La red ferroviaria del país se compone de más de 90,000 km de rutas ferroviarias convencionales y aproximadamente 10,000 km de líneas de alta velocidad. Entre sus principales trenes encontramos el Maglev y el Fuxing para nuestro análisis vamos a realizar un estudio del Fuxing.

RUSIA: Toda la red de Rusia, operada por la empresa de propiedad estatal, dispone de una longitud de ruta operativa 87.157 kilómetros de red ferroviaria (Flores, 2021) y transporta más de mil millones de pasajeros y mil millones de toneladas de carga (siendo el tercero en el mundo por volumen de mercancías después de los EE.UU. y China). La red ferroviaria rusa incorpora 12 líneas principales, muchas de las cuales ofrecen conexiones directas a los sistemas ferroviarios nacionales europeos y asiáticos como Finlandia, Francia, Alemania, Polonia, China, Mongolia y Corea del Norte. Aunque su línea más larga sin escalas en la actualidad, el Transiberiano de Moscú hasta Pyongyang, ha sido superada en extensión por la línea internacional de mercancías que une Yiwu, al este de China, con Madrid, gracias a sus 13.052 kilómetros de vía, Rusia sigue demostrando su poder como, por ejemplo, en las dimensiones épicas de sus obras ferroviarias que conectan Europa con Extremo Oriente.

INDIA: La red ferroviaria nacional de la India, la cuarta más larga del mundo, es operada por la una empresa estatal, Indian Railways consta de una longitud total de vía de 126.366 km en una ruta de 67.956 km junto con 7.335 estaciones. Los ferrocarriles operan diariamente 13.523 trenes de pasajeros y 9.146 trenes de carga. (Sethi, 2023)

CANADÁ: Los 48,000 km de líneas ferroviarias de Canadá hacen que su red nacional sea la quinta más larga del mundo. La Canadian National Railway (CN) y la Canadian Pacific Railway (CPR) son las dos principales redes ferroviarias de mercancías que operan

en el país, mientras que Vía Rail opera 12,500 km de servicio ferroviario de pasajeros interurbano. (Román, 2018) Algoma Central y Ontario Northland son algunos de los otros operadores de ferrocarriles más pequeños que prestan servicios de viajeros a ciertas zonas rurales en el país. Montreal, Toronto y Vancouver tienen sistemas extensivos de tren de cercanías.

ALEMANIA: La compañía de propiedad estatal Deutsche Bahn es el principal operador de la red ferroviaria de 41,000 km de Alemania, representando alrededor del 80% del tráfico total de mercancías y el 99% del tráfico total de pasajeros de larga distancia. (Román, 2018) No obstante, en su red operan más de 150 compañías ferroviarias privadas además de Deutsche Bahn, tanto en la prestación de servicios regionales de pasajeros como de carga. El S-Bahn sirve a las principales áreas suburbanas, mientras que el Hamburg Coloane Express (HKX) es el mayor operador de larga distancia de pasajeros después de Deutsche Bahn.

AUSTRALIA: La red ferroviaria de Australia es la séptima más larga del mundo con sus 40,000 km. (Román, 2018) La mayor parte de la infraestructura de la red ferroviaria es mantenida y en propiedad por el gobierno australiano, ya sea a nivel federal o estatal. Sin embargo, la mayoría de los trenes que prestan servicio en la red son operados por compañías privadas. Australia no dispone todavía de líneas de alta velocidad, aunque se ha propuesto una línea ferroviaria de alta velocidad que conectará Brisbane, Sydney, Canberra y Melbourne que será construida con un valor estimado de 86.7 mil millones de euros.

ARGENTINA: La actual red ferroviaria de Argentina, que abarca una extensión de 36,000 km, se posiciona como la octava red más larga del mundo. Argentina alcanzó 47,000 km de red ferroviaria a finales de la Segunda Guerra Mundial; (Román, 2018) pasó de manos del Estado a ser privatizada, y luego sufrió desmantelamientos y desguaces.

FRANCIA: Con 29,000 km, la red ferroviaria francesa es la segunda más extensa de Europa y la novena más larga en el mundo. Su red está predominantemente centrada en la prestación de servicios a pasajeros, estando más del 50% de las líneas del país completamente electrificadas. (Partal, 2016)

BRASIL: La red ferroviaria de Brasil fue nacionalizada en 1957 con la creación de la Rede Ferroviaria Federal Sociedad Anónima (RFFSA). Siendo la décima red ferroviaria más larga del mundo, y se divide en diferentes servicios para ser operada por una serie de operadores privados y públicos. La red de 28,000 km (Partal, 2016) está predominantemente centrada al transporte de mercancías e incluye las principales líneas ferroviarias de mineral de hierro.

4.3. Características de trenes nuevos y más especiales del mundo

4.3.1 RENFE SERIE S – 730 (hibrido)

La Serie S – 730 de RENFE, es un modelo híbrido el cual surge de la adaptación de la Serie S – 130. Este modelo tiene la particularidad de poder circular por vías electrificadas en corriente alterna a 25kV y 50 Hz, por vías electrificadas en corriente continua a 3000Vcc y además por líneas sin electrificar gracias a sus dos motores de alimentación diésel.

Diseñado especialmente para cubrir los tramos Madrid – Galicia en los cuales circula por tramos de alta velocidad que ya se están operando, tanto a 25kV en alterna como a 3000Vcc y por tramos pendientes de electrificar mediante sus motores diésel. En cuanto al sistema de tracción mediante las alimentaciones por parte de la catenaria tanto en alterna como en continua, el tren se abasteciendo tanto de potencia para el movimiento, como de tensión para el uso de los servicios auxiliares mediante el uso de los motores diésel. (Fiel, 2016)

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL S 730	
Fabricante	Talgo-Bombardier
Número de unidades	15
Ancho de vía	1.668 mm/1.435 mm
Tracción	eléctrica/diésel-eléctrica
Longitud total	185 metros
Longitud cabeza matriz	20 metros
Anchura máxima	2.96 metros
Altura	4 metros
Peso	361 toneladas
Velocidad máxima	250 km/h (ancho UIC), 220 km/h (ancho ibérico)
Aceleración máx. en curva	1.2 m/s ²
Tensión	25 kV, 50 Hz ca/3 kV cc
Potencia instalada	4.800 kW ca/4.000 kW cc/2.400 kW diésel
Motores	8 asíncronos/2 motores diésel
Ejes	Bo-Bo
Ejes tractores	8
Peso máximo por eje	18 t
Frenado neumático	Dos discos por eje
Frenado eléctrico	De recuperación (2.400 kW) y resistivo (2.000 kW)
Cambio de ancho	Sistema Talgo RD
Sistemas de seguridad	ASFA digital, STM de LZB, Ertms
Composición	Cabeza matriz (2), coche extremo técnico (2), coches (9)
Plazas	265-289
MOTOR DIÉSEL	
Modelo	12v 4.000r 431
Potencia	1.800 kW (2.248 Cv) a 1.800 rpm
Consumo	190 g/kWh
Cilindrada unitaria	4.77 litros
Cilindrada	57,23 litros
Peso	6.600 kg



Ilustración 2. Características técnicas RENFE Serie S – 730

4.3.2 TALGO AVRIL

El talgo AVRIL es una plataforma de trenes de alta versatilidad y muy alta velocidad (380km/h) desarrollada por la empresa TALGO, esta plataforma de trenes consta de 2 modelos, el primer prototipo es un modelo G3 bitensión 1,5 kVcc/25kVca, la velocidad máxima es de 380 km/h y tiene cajas más anchas y un aumento de la capacidad de pasajeros, mejoras en la aerodinámica lo cual permite mayor eficiencia energética. En el caso del siguiente modelo, el G4 el cual está aún en fase de desarrollo, la principal característica es la motorización de los 3 bogíes (bogie son dos pares de ruedas montadas sobre ejes paralelos que se utilizan en ambos extremos de los vehículos de gran longitud) de los que dispone en cada extremo mientras que los bogíes intermedios son todos remolcados. 57% de las ruedas sean motorizadas, mayor que el 50% conseguido hasta ahora, la versión 25kV y 50 Hz sería capaz de desarrollar una potencia de 12000 kW, pudiendo tener también la opción de motorización híbrida incluyendo un motor diésel. (Calleja, 2016)



4.3.2 TREN MAGLEV

El maglev es un tren cuya tecnología empleada se basa en la levitación magnética, gracias a esta tecnología se consigue la suspensión, guiado y propulsión del propio tren consiguiéndose levantar del suelo flotando literalmente encima de las vías.

El empleo de un gran número de imanes formados por distintos óxidos de cobre, los cuales permite la suspensión y propulsión del tren a base de la levitación magnética. Este método de transporte tiene la ventaja de ser más rápido, silencioso y cómodo que los sistemas de transporte público sobre ruedas convencionales. El principio de levitación magnética de un tren maglev se consigue mediante la interacción de campos magnéticos

que dan lugar a fuerzas de atracción o repulsión dependiendo del diseño del vehículo, es decir, dependiendo si el tren utiliza un sistema EMS (electromagnetic suspension) o EDS (electrodynamic suspension).

(Calleja, 2016)



Ilustración 4. Tren MAGLEV

5. Metodología

En primera medida, en el marco teórico se recolectó la información de las diferentes alternativas de tracción, lo que nos permitió generar una hoja de vida de cada uno de los equipos y así ir ordenando la información de estos, así como la referenciación de los principales trenes de los principales países del mundo, con base en los anterior a continuación se realiza un análisis donde se puede apreciar el comportamiento de cada uno de los elementos y por último, se definen las calificaciones llegando a conclusiones generales de cada uno de los sistemas y por último se procede a emitir la recomendación.

5.1 Resultados de la comparación de los sistemas de tracción

5.1 Diferencias Ambientales

5.1.1 Comparación medioambiental entre tracción diésel-eléctrica y tracción a gas natural

A continuación, veremos la comparación medioambiental entre tracción diésel-eléctrica y tracción a gas natural, actualmente existe una locomotora de gas natural probada y comercialmente disponible para el mercado en Estados Unido y está disponible sólo como un producto de actualización o conversión. (Railroads, 2007)

Mode	THC	NMHC	CO	NO _x	PM
ECI Natural Gas Conversion	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

Ilustración 5. Comparación de la locomotora de transporte de línea con combustible a gas natural y locomotoras diésel

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, por tanto, no se observa beneficio de NO_x al usar la locomotora alimentada con gas natural, y todos los demás criterios de emisiones de contaminantes son más altas, incluidas las partículas, que son de cuatro a cinco veces mayores. En comparación con el funcionamiento de la misma locomotora con combustible diésel, el gas natural es menos eficiente energéticamente y produce más emisiones de gases de efecto invernadero (CO equivalente).

Las emisiones de gas natural son peores que las emisiones de una locomotora diésel moderno. Las locomotoras de GNL son más caras que los equipos diésel para operar, y se necesita una infraestructura de combustible completamente nueva

5.1.2 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 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. (Alvarez, 2011)

5.2 Diferencias Económicas

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. (Alvarez, 2011)

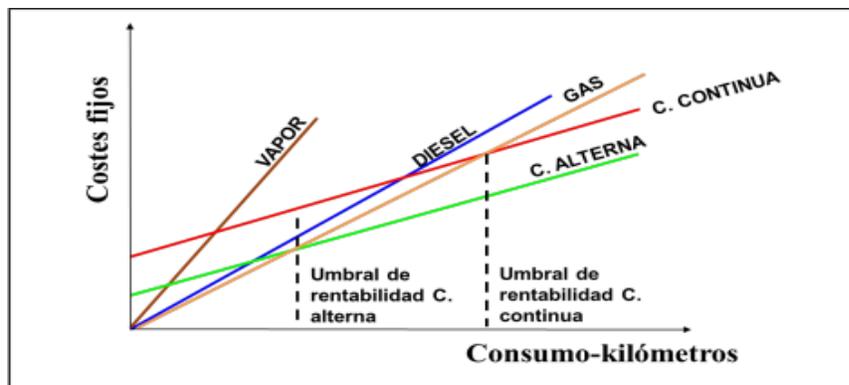


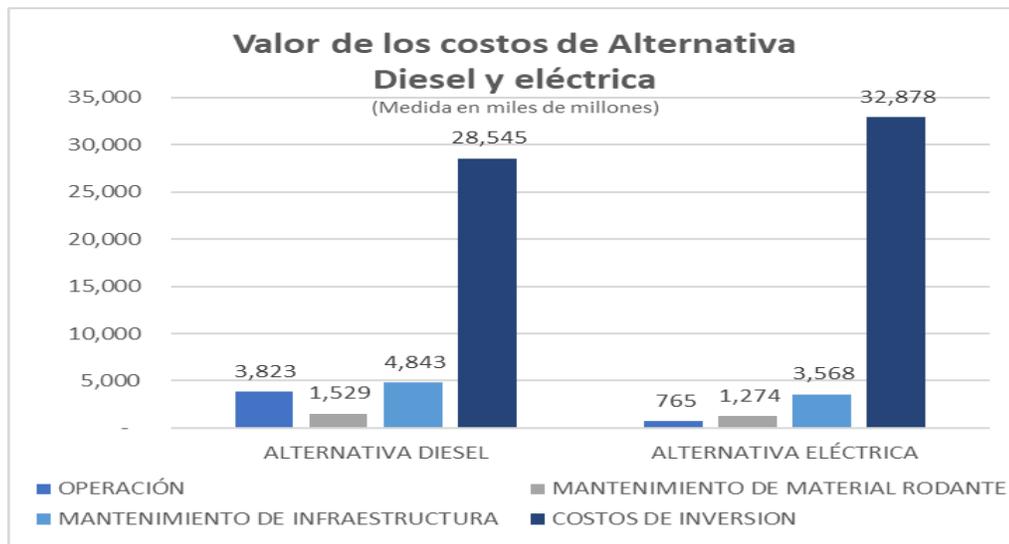
Ilustración 6. Rentabilidad de electrificación según cierto umbral de tráfico

En la ilustración 6 se presenta un sistema de cálculo clásico, presentando unos valores de referencia, donde se muestra el punto a partir del cual es rentable la electrificación según cierto umbral de tráfico. Si bien la ilustración representa a grandes rasgos la

reducción de costos fijos según el consumo-km dependiendo del umbral de tráfico para diversos sistemas de tracción, esta metodología tradicional debe de considerar los costos globales del sistema, incluyendo los costos de inversión, de mantenimiento y de operación. (Pita, 2008)

RUBRO	ALTERNATIVA DIESEL	ALTERNATIVA ELÉCTRICA
OPERACIÓN	3,823	765
MANTENIMIENTO DE MATERIAL RODANTE	1,529	1,274
MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURA	4,843	3,568
COSTOS DE INVERSION	28,545	32,878

Valor en miles de millones COP



elaboración propia a partir de

(Bnamericas, 2020)

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) mucho más alta, pero posteriormente produce unos costos menores de explotación, ya que el costo económico de la energía consumida es menor en la tracción eléctrica, al igual que el costo de mantenimiento de las máquinas. Esta reducción de costos corrientes compensa el costo de la electrificación. (Alvarez, 2011)

Tabla 2. Comparación de sistemas de tracción elaboración propia a partir de (Alvarez, 2011)

CALIFICACIÓN	PTOS
Bajo	10
Medio	5
Bajo	3

CRITERIO DE EVALUACIÓN	SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA	SISTEMA DE TRACCIÓN DIESEL- ELÉCTRICA	SISTEMA DE TRACCIÓN A GAS
Características técnicas			
Motor	Motores eléctricos de corriente continua y de corriente alterna (asíncronos)	Motor de combustión interna (motor térmico tipo diesel) 2 o 4 tiempos	Turbina de gas natural
Aceleración	Entre 0,8 a 1,2 m/seg ² ✓	0,3 m/seg ² !	0,48 m/seg ² !
Energía	Energía eléctrica externa (catenaria, tercer carril) Recuperación de energía ✓	Combustible fósil !	Combustible fósil no renovable !
Velocidad Máxima	201 km/h ✓	140, 160 o 200 Km/h ✓	120 km/h ✗
Potencia [kW]	6400 Kw ✓	2700 Kw !	2700 Kw !
Rendimiento energético	80%-90% ✓	30% (de 100 litros de combustible, 70 litros se transforman en calor y contaminantes) ✗	30%-40% ✗
Apecto Medioambiental			
Ruido y vibraciones	Bajo ✓	Medio !	Alto ✗
Emisiones	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Consumo energético	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Impacto ambiental	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Aspecto de Mantenimiento			
Averías en instalaciones eléctricas	Alto ✗	No Aplica ✓	No Aplica ✓
Aceleración y frenado	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Peso adicional de su combustible	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Costo del mantenimiento de las instalaciones	Bajo ✓	No Aplica ✓	No Aplica ✓
Costo del mantenimiento del material rodante	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Aspecto económico			
Inversión en material Rodante	Alto ✗	Bajo ✓	Bajo ✓
Inversión en instalaciones fijas	Alto ✗	No Aplica ✓	No Aplica ✓
Cantidad de locomotoras para una misma potencia	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Costo de la energía	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Costo total en la construcción	Alto ✗	Bajo ✓	Bajo ✓
Costo total en la operación	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Costo total para el sistema ferroviario	Bajo ✓	Alto ✗	Alto ✗
Costo de inversión inicial	Alto ✗	Bajo ✓	Bajo ✓
PUNTAJE TOTAL	185	123	114

De la tabla 2. Comparación de sistemas de tracción se presenta una comparación entre los criterios de evaluación técnico, medioambiental, mantenimiento y económico entre los sistemas de tracción evaluados. Se puede observar que de 22 aspectos, la tracción eléctrica tiene 17 positivos lo que corresponde al 77%, seguido de la opción de tracción Diesel Eléctrica con 7 criterios positivos (32%) y tres medios y por último el sistema de tracción a gas con sólo 6 criterios positivos correspondiente al 27%.

Las ventajas del uso de tracción eléctrica frente a la tracción diesel son muy claras, tanto desde el punto de vista operativo, energético como medioambiental:

- **Operación:** Los trenes eléctricos ofrecen mejores velocidades de operación, lo cual los hace más atractivos para los viajeros. La barrera de los 250 km/h ha sido superada gracias a la tracción eléctrica y no existe en el mundo operación ferroviaria que la supere de otro modo. El cálculo de costos operativos es más estable por no depender directamente de la volatilidad del precio del petróleo, lo que permite mayor rentabilidad y aprovechamiento de los recursos. También, cabe mencionar que un sistema de tracción eléctrica permite mejores índices de mantenimiento, al contar con un diseño más simple y de menos partes.
- **Energía:** La eficiencia total del sistema es mayor; es decir, la energía se aprovecha mucho mejor. Desde que se produce, la energía sufre pérdidas “aguas arriba” en los procesos de generación, transmisión y distribución, pero el total va a depender mucho de la tensión de suministro. La eficiencia “tank to wheel” de la tracción eléctrica ronda el 90% en casi toda la banda de RPMs, mientras que la de un motor diesel apenas alcanza el 35% en condiciones ideales.. Además, existe la posibilidad de uso del freno regenerativo para aprovechar parte de la energía del frenado y así alimentar los sistemas auxiliares del tren, disminuir el frenado reostático y devolver energía a la catenaria para ser aprovechada por otras unidades. (Caceres, 2022)
- **Medioambiente:** Desde el punto de vista ambiental, la tracción eléctrica presenta alguna ventaja en la disminución en los niveles de contaminación sonora y otras, aunque leves. Su principal ventaja radica en su baja huella de carbono.

Debido a la escasa infraestructura de conducción y transmisión del gas natural en Antioquia y teniendo en cuenta que para el año 2017 las locomotoras con tracción a gas natural no están completamente desarrolladas, 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, por tanto el sistema de tracción a gas se descarta porque influiría en elevados costos si se eligiera ese sistema.

Tabla SEQ Tabla 1* ARABIC 3. Comparativo de tecnologías en locomotoras elaboración propia a partir de CITATION Fu07 U 9226 (Wims, 2007);CITATION Jer21 U 9226 (Bombardier, 2021) CITATION Mai20 U 9226 (MainlineDiesel, 2020)

Locomotoras	Tecnología	Modo de operación	Velocidad máxima [km/h]	Potencia [kW]	Fuerza tracción arrastre [t]	Comentarios
Series TRAXX AC de Bombardier	Gris	Eléctrica pura: 15 kVCA y 25 kVCA	140	5600	300	La TRAXX AC3LM con "Last Mile Diesel Engine" que permite operación en las del tren en las últimas millas, ya se a para llegar a parqueaderos y terminales no electrificados a baja velocidad
Series TRAXX DC de Bombardier	Gris	Eléctrica pura: 3 kVCC	160	5400	300	Empleadas para el transporte de carga y pasajeros. Se han ordenado para Italia, España con la TRAXX F140 89 DC y en Polonia la TRAXX P160 DC.
Series TRAXX MS de Bombardier	Gris	Eléctrica pura: 1.5, 3, 15 y 25 kVCA	160	5600	300	Transita entre Bélgica, Francia, los Países Bajos, Alemania, Polonia, Austria, Italia y Suiza y ha sido homologada para el transporte de carga y pasajeros.
Series TRAXX DE de Bombardier	Blanca	Diésel - eléctrica	140, 160 o 200 (dependiendo de la configuración)	2200- 2400	270	Locomotoras TRAXX P160 DE y TRAXX F140 DE
Series ALP 46y Series ALP 46A de Bombardier	Gris	Eléctrica pura: 12.5 kVCA= 25 Hz y 60 Hz y 25 kVCA=60 Hz	160, 201	5300- 5600	316	La ALP 46 opera desde 1996 para el New Jersey Transit
Series ALP 46A de Bombardier	Gris	Eléctrica pura: 12.5 kVCA = 25 Hz 12.5 kVCA = 60 Hz y 25 kVCA = 60 Hz	201	5600	316	La ALP 46A opera desde 2008 como una versión mejorada
Series ALP 45DP de Bombardier	Blanca	Híbridas o duales: 25 kVCA y 12.5 kVCA= 60 Hz	160 (diésel) 201 (eléctrica)	2700 (diésel) 4000 (eléctrica)	316	Puede emplearse para el transporte de mercancías ligeras de peso medio.
IORE de Bombardier		Eléctrica pura: 15 kVCA = 16.7 Hz	80	10800	1200	Transporte carga de aproximadamente 8200 Tn en pendiente de 10% a velocidades mínimas de 35 km/h.
Vossloh/Stadler clase 88	Blanca	Híbridas o duales: 25 kVCA = 50 Hz	50 (diésel) 160 (eléctrica)	700 (diésel) 4000 (eléctrica)	317	Existen en versión para transporte de pasajeros y de carga
Euro 4000 de Vossloh	Gris	Eléctrica pura: 1.5 kVCC, 3 kVCC, 15 kVCA = 16.7 Hz y 25 kVCA = 50 Hz	120 (ambos modos)	2800 (diésel) 5000 (eléctrica)	475	Empleadas para el transporte de mercancía.
DE 12y 18 de Vossloh	Blanca	Diésel - eléctrica	120	1200- 1800	300	Locomotoras de cuatro ejes con un peso entre 80y 90 Tn
PRIMA M4 de Alstom	Gris	Eléctrica pura: 1.5 kVCC, 3 kVCC, 15 kVCA = 16.7 Hz y 25 kVCA = 50 Hz	140 (transporte de carga) 200 (transporte de pasajeros)	6400	350	Locomotoras modulares y reconfigurables adaptada a las necesidades de cada operador
PRIMA T8 de Alstom	Gris	Eléctrica pura: 3 kVCC y 25 kVCA = 50 Hz	120	10000	833	Capaces de mover hasta 9000 Tn. Pueden fundonar en clim extremo (- 50°C a +50°C)
Dash 9-40BBW y AC4400 Series de General Electric	Blanca	Diésel - eléctrica	x	Motor diésel de 4100 HP y 4500HP	316- 718	Están equipadas con un motor diésel de dieciséis cilindros se emplean principalmente para el transporte de carga pesada
ES43B Bi y ET44AC de General Electric (Evolution Series)	Blanca	Diésel - eléctrica	112	Motor diésel de 4400 y 4500 HP	x	Están equipadas con un motor de doce cilindros produce la misma potencia que con uno de dieciséis, reduce las emisiones de óxido nítrico y optimiza el consumo de combustible
PH37ACi (L620) y (L621) de General Electric (Powerhaul Series)	Blanca	Diésel - eléctrica	120	Motor diésel de 3700 HP	450-544	Disenñadas para operar en Alemania y Turquía cumpliendo con todos los estándares europeos, como la UIC 505-1
PH37ACi y PH37ACmi (L621) de General Electric (Powerhaul Series)	Blanca	Diésel - eléctrica	120	Motor diésel de 3700 HP	544	Disenñadas para operar en Alemania y Turquía cumpliendo con todos los estándares europeos y cumplir con las regulaciones del Reino Unido. como la UIC 505-1

6. Análisis, resultados y recomendaciones

Considerando los valores presentados en la Tabla 2, las conclusiones que se pudieron obtener a partir de esta y la descripción de la operación del proyecto ferrocarril de Antioquia, la mejor alternativa de sistema de tracción es electrificar la línea en el tramo 2 el cual se proyectaría como un Sistema Férreo Multipropósito (SFM) donde se transportarán inicialmente pasajeros (entre los municipios de Caldas y Barbosa) y RSU desde el sector de Caribe (al norte del municipio de Medellín) debido a que la frecuencia de paso de trenes es alta, mientras que los tramos 1 y 3 serían para transporte de mercancías, se define que el sistema de tracción diésel- eléctrica sería el más recomendable, al tener un paso de tren tan bajo.

La recomendación para el tramo 2 (transporte de pasajeros) se hace en base a que la tracción eléctrica es superior en rendimiento, comodidad e impactos externos y así alimentar un tráfico elevado de trenes para transportar a estos viajeros, a pesar de que requiere una inversión inicial 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. Y para los tramos 1 y 3 (transporte de mercancía) los trenes de tracción diésel-eléctrica son superiores para líneas secundarias y de poco tráfico. 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.

La selección de la alternativa en la implementación de la tracción es definida por

costos, para ello se estable que la tracción eléctrica es rentable para líneas de mucho tráfico y en zonas de túnel bajo montaña o por debajo del mar. Y para líneas de bajo tráfico, es más rentable la tracción con motor diésel.

8. Presupuesto

Actividad – Elemento	Costo
Recolección de información	100000
Costo de transporte	30000
Computador 64 GB RAM	5200000

9. Referencias Bibliográficas

- Alvarez, G. (2011). *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril*. Madrid.
- Bellot, A. (15 de 04 de 2019). Obtenido de <https://alcanzia.es/blog/que-es-la-tension-electrica/#:~:text=2%20%E2%80%93%20Se%20considera%201%C2%AA%20Categor%C3%ADa,alta%20tensi%C3%B3n%20de%201%C2%AA%20Categor%C3%ADa>.
- Bnamericas. (09 de 06 de 2020). *Bnamericas*. Obtenido de <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/los-pros-y-contras-de-los-motores-a-diesel-y-electricos-para-el-tren-maya>
- Bombardier. (29 de 06 de 2021). *TRAXX - Electric Locomotive - Bombardier Transportation*. Obtenido de <https://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/locomotives/traxx.html>
- Caceres, J. (24 de 02 de 2022). *Mundo ferroviario*. Obtenido de <https://mundoferroviario.lat/2022/02/24/traccion-electrica-ferroviaria-y-sostenibilidad%E2%80%93BC/>
- Calleja, Á. F. (2016). *Sistemas de tracción eléctrica*. Valladolid.
- Fiel, Á. (2016). *Sistemas de tracción eléctrica ferroviaria*. Valladolid.
- Flores, A. (14 de 07 de 2021). *El Economista.es*. Obtenido de <https://www.economista.es/especial-ferrocarril/noticias/11312731/07/21/Vias-ferreas-que-dominan-el-mundo-EEUU-China-y-Rusia-.html>
- García, E. (29 de 12 de 2016). <https://eadic.com/>. Obtenido de <https://eadic.com/blog/entrada/traccion-ferroviaria-un-sistema-clave-en-el-material-rodante/>
- MainlineDiesel. (2020). *MainlineDiesel*. Obtenido de <http://www.mainlinediesels.net/index.php?nav=1000929&lang=en>
- Partal, R. E. (16 de 03 de 2016). *Inbound Logistics latam*. Obtenido de <https://www.il-latam.com/blog/southamerica-logistics/infraestructura-ferroviaria-en-america-latina/#:~:text=Con%2029%2C000%20km%2C%20la%20red,l%C3%ADneas%20del%20pa%C3%ADs%20completamente%20electrificadas>.
- Pita, A. L. (2008). *Explotación de líneas de ferrocarril Infraestructuras ferroviarias*. Barcelona: Edicions UPC S.L.
- Railroads, T. A. (2007). *BNSF Railway Company Union Pacific Railroad Company*.
- Román, V. (15 de 09 de 2018). *Nmas1*. Obtenido de <https://nmas1.org/news/2018/09/15/paises-trenes-extensos-tecnologi>
- Schulte. (2001). *Issues affecting the acceptance of hydrogen fuel. International Journal of*
- Sethi, K. (27 de 03 de 2023). *Invest India*. Obtenido de <https://www.investindia.gov.in/es-es/sector/railways>

Vitins, J. (2007). *Electric locomotives for freight corridors*. IREE.