

Electrificación de un Sistema Férreo en Colombia: Antioquía- Caribe

Resumen — El presente trabajo pretende dimensionar un sistema ferroviario eléctrico para una ruta establecida por el Dr. Gabriel Poveda Ramos, a partir de un trabajo previo del Ingeniero Gabriel Sanín Villa, comprendida entre los municipios de Envigado y Arboletes en Antioquia. A partir del cálculo analítico de la potencia requerida por el material rodante, con su respectivo cronograma de viaje, se estima la potencia necesaria de las subestaciones de tracción (SET). Posteriormente se realizan simulaciones en OpenTrack y OpenPowerNet para evaluar el efecto de la circulación de los trenes en el tiempo. Con los resultados obtenidos se simula el sistema férreo electrificado conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN) mediante DigSILENT para evaluar los indicadores de la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE). Finalmente se realiza un análisis financiero que permite identificar la viabilidad de diferentes alternativas de operación: locomotoras diésel - eléctrica, duales (diésel - catenaria) o eléctrica pura.

Abstract — The objective of the present work is to select and size the electric trains and infrastructure required for an electrical railway system on a route established by Dr Gabriel Poveda Ramos, from a previous work of the Engineer Gabriel Sanín Villa. The route connects the Municipality of Envigado with Arboletes in Antioquia. First, considering way profile, freight and train schedule, the power required by the rolling stock is established, using an analytical calculation. Locomotive tractive effort and power, Traction Substation demand and voltage limits accomplishment are validated using computer simulation using OpenTrack and OpenPowerNet. Railway connection impact into National Electric System (SIN) is simulated using DigSILENT, allowing assessing Power Quality (CPE) compliance. Finally, a financial analysis is carried out to identify the viability of different operating alternatives: diesel, electric or dual diesel-electric locomotives.

AUTORES:

Daniel Longas Sánchez
Andrés Emiro Díez Restrepo
Daniel Alberto Arroyave Molina
Armando Bohórquez Cortázar
Universidad Pontificia Bolivariana

Palabras Clave — Ferrocarriles, Tracción Eléctrica, Calidad de la Potencia.

Key Words — Railway, electric traction, Power Quality.

I. INTRODUCCIÓN

Los ferrocarriles son un medio alternativo y práctico para considerar en el transporte de grandes cantidades de carga en Colombia, actualmente basado en camiones (con excepción de los trenes carboneros), pues permitirían disminuir los costos de flete, por su relativo bajo costo de operación y mantenimiento, y por su alto nivel de prestaciones. Además de ser más eficientes, rápidos, seguros y confiables, permitirían reducir el costo de operación de las concesiones viales, evitando el efecto que tienen los tracto-camiones más pesados, desgastando las vías. Adicionalmente los desarrollos tecnológicos a nivel mundial han permitido mejorar el desempeño de las locomotoras eléctricas ante la necesidad de disminuir la dependencia de los recursos fósiles y el compromiso de contribuir con el cuidado del medio ambiente reduciendo las emisiones de gases contaminantes.

En este trabajo se pretende hacer un estudio de pre factibilidad de electrificación de una ruta férrea propuesta por el ingeniero Gabriel Sanín Villa y el Dr. Gabriel Poveda Ramos, considerando algunas modificaciones, y teniendo en cuenta los proyectos de infraestructura portuaria en la región del Urabá Antioqueño. Un proyecto de este tipo, aparte de ser amigable con el medio ambiente, aprovecha el potencial hidroeléctrico con el que cuenta el país, donde más del 65% de la capacidad neta efectiva es obtenida a partir de las centrales hidroeléctricas [1].

Para la operación de un sistema férreo, ya sea híbrido o eléctrico puro, se requiere analizar la conveniencia de un sistema de alimentación en Corriente Directa (CD) o CA, de acuerdo con su utilización o tipo (tranvía, metro o ferrocarril), tráfico (viajeros, mercancía o mixto), la potencia requerida, la distancia, la topografía y el grado de explotación. Finalmente, se debe evaluar la factibilidad para conexión a las redes de Media y/o Alta Tensión, sin que ocasionar perturbaciones electromagnéticas considerables en la red eléctrica, cumpliendo los parámetros de la Calidad de la Potencia (CPE).

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ruta propuesta por el ingeniero Gabriel Sanín Villa y complementada por el Dr. Gabriel Poveda Ramos, entre el municipio de Envigado hasta Arboletes, con una longitud de aproximadamente 442 km facilita la salida de las cordilleras que encierran el área metropolitana del Valle de Aburrá a unos 1500 Metros Sobre el Nivel del Mar (m.s.n.m). aproximadamente, con pendientes del 3% como máximo.

La ruta está compuesta por nueve estaciones de parada para el intercambio de mercancías como plantea Roldán [2], basado en datos de la gobernación de Antioquia, alcaldías municipales y otros sitios web; las cuales se distribuyen de la siguiente manera de acuerdo con los municipios por los que transita y sus respectivas actividades económicas.

Estaciones Terminales (ET): Envigado y Arboletes.

Estaciones Intermedias (EI): Bello (con taller y patio), Barbosa, Amalfi, El Pato y Planeta Rica.

Estaciones Intermedias Multimodales: Caucasia y Montería Sur.

De acuerdo con el estudio realizado por Roldán [2] basado en datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), se espera que el sistema férreo pueda transportar (importación) cuatro millones de toneladas anuales con un crecimiento del 3% cada año, y dos millones quinientas mil toneladas de exportaciones anuales con un crecimiento anual del 5%. La velocidad máxima de operación es de 120km/h de acuerdo a recomendaciones de ingenieros ferroviarios de la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos (SAI), que se podría clasificar dentro del rango de las velocidades convencionales (entre 79 y 90 mph), para el transporte de mercancías [3, p. 16]. Se espera que la carga pagada por tren sea de 1525 Tn. Conociendo el problema de electrificar desde el inicio de la operación los 442 km de la ruta, se propone un esquema de electrificación parcial y gradual, utilizando locomotoras duales diésel-eléctricas, y tramos parciales con catenaria. Es importante aclarar que Colombia carece de electrificación ferroviaria, siendo el Metro y Tranvía de Medellín el único ejemplo de un sistema de este tipo que opera en la actualidad.

III. DIMENSIONAMIENTO DEL MATERIAL RODANTE

A continuación, se detalla el procedimiento para determinar la potencia mínima que requiere la locomotora o grupo de locomotoras para mover el material rodante.

A. Selección de los Vagones

Para el caso de estudio se emplea material remolcado tipo L, clase Lgss (L: Vagón de plataforma especial con ejes independientes; g: Para el transporte de contenedores; ss: Velocidad máxima de 120 km/h), correspondiente a la UIC 571-4, de 9 m de base, 13,86 m de longitud sobre borde, 12,52 m de longitud de carga mínima, y peso propio máximo de 12 Tn.

Teniendo en cuenta el peso de la carga pagada, y que cada vagón puede transportar 30,5 Tn, equivalente a un contenedor de 40 ft y peso bruto máximo de 42,5 Tn, la cantidad de vagones que se requieren son aproximadamente cincuenta, con un peso total del material remolcado correspondiente a 2125 Tn, sin considerar el peso de las locomotoras.

B. Selección de las Locomotoras

Para un estimativo de la potencia mínima requerida del material automotor, primero se puede determinar mediante el cambio de energía cinética por unidad de tiempo, suponiendo aceleración constante de acuerdo con la Ecuación (1). Este valor está dado en términos de (J).

$$E_k = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (1)$$

Donde m es la masa total del tren en (kg) y v es la velocidad en (m/s). Por lo tanto, la energía requerida es de 1180,6 MJ para una pendiente de 0%, sin considerar la fuerza de rodadura ni la fuerza de arrastre aerodinámico. Luego se determina el tiempo que se demora la locomotora en alcanzar la velocidad objetivo de 120 km/h a una aceleración constante de 0,11 m/s². Se emplea entonces las ecuaciones del Movimiento Uniformemente Acelerado (MUA), donde obtiene un tiempo estimado de 300 s para este caso. La potencia mínima de arranque es de 3,98 MW en el riel, valor que sirve de referencia para escoger de manera preliminar el material rodante. Posteriormente debe incluirse la energía cinética de la masa rotacional y las pérdidas por fricciones de rodamiento y arrastre aerodinámico. Finalmente, la capacidad de arranque en pendiente. Estas evaluaciones se hacen mediante simulación con el programa OpenTrack.

Solo como referencia y para efectos del estudio, una locomotora ALP 45DP de Bombardier cuenta con una potencia ajustada a las necesidades del caso. Es importante aclarar que, aunque esta locomotora puede trabajar en modo múltiple hasta dos unidades, gracias a la operación en modo push-pull [4, p. 56], no impide que mediante los sistemas de control computacionales se puedan acoplar otras de la misma referencia; no obstante, este modo de trabajo se emplea únicamente en el presente trabajo para estimar la frecuencia de despacho de los trenes y la potencia requerida.

IV. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ELECTRIFICACIÓN

Los sistemas en CC de 750 V y 1500 V se emplean principalmente para el transporte urbano e interurbano como tranvías y metros, mientras que los sistemas en CC de 3000 V y en CA 1x25 kV ó 2x25 kV normalmente se emplean para el transporte de cargas a grandes distancias. El avance de las tecnologías permite que la selección del voltaje de operación se centre en la distancia de la ruta, la aplicación (material rodante requerido) y el costo de la infraestructura [5]. Según Nyberg y Pollard [6], la transmisión en CA es más económica y práctica para altos voltajes a largas distancias de manera segura y eficiente, siendo el sistema a 25 kV el estándar empleado en la mayor parte de Europa. Otro punto a favor de los sistemas en CA es que países como Estados Unidos los prefieren para los nuevos ferrocarriles de alta velocidad y de larga distancia [7].

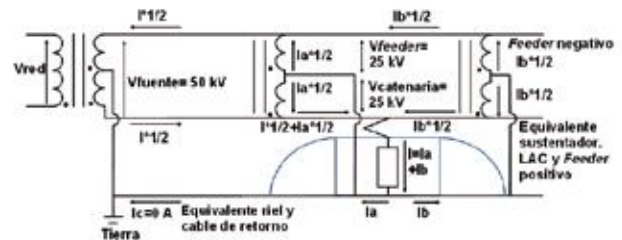
El sistema de 3000 V requiere que las SET no estén separadas más de 20 km. Si se compara con un sistema en CA, donde la distancia mínima son 30 km [5], [8], [9], [10], se tiene una ventaja respecto al costo de las SET en función de la distancia del trazado, sin mencionar que este último no requiere grupo rectificador adicional por SET.

Otra ventaja que facilita el empleo de sistemas de CA en comparación con los de CC que aplica para el caso de estudio, es la poca distancia que existe entre la ruta y las fuentes de Alta Tensión (HV, por sus siglas en inglés), a diferencia de las redes de distribución que son escasas y alejadas en estas zonas principalmente rurales, y no cumplen con los requerimientos mínimos de potencia y regulación para alimentar un sistema a 3000 V en CC.

Al comparar entre los sistemas 1x25 kV y 2x25 kV, el último tiene la ventaja de duplicar la distancia requerida entre las SET. De la misma manera, los autotransformadores Booster (TB), requeridos para compensar las caídas de tensión, pueden estar separados hasta 15 km en el sistema 2x25 kV, con relación de transformación 1:1 [8], estos equipos están distribuidos a lo largo de la catenaria conectando el punto medio a tierra como se observa en la Figura. 1. Para el sistema 1x25 kV la distancia máxima entre TB es de 8 km, los cuales se conectan en serie con un aumento de la impedancia y mayores caídas de tensión en la catenaria; al tener una potencia menor podrían ser instalados en poste, lo que se traduce en menores costos, pero se incrementan los problemas de interferencia electromagnética, los potenciales riel – tierra y las caídas de tensión. Precisamente por esto se prefieren los sistemas 2x25 kV, al aumentar la potencia la disponible en Línea Aérea de Contacto –LAC-, mejorar los perfiles de tensión, y lograr que

los campos magnéticos tienden a cancelarse mutuamente (feeder positivo y feeder negativo) [6, p. 10], [10, p. 13]. Sin embargo, el costo de la catenaria aumenta debido a que se requiere un alimentador adicional o feeder negativo. Este costo se compensa en cierta medida con el sistema gracias a la reducción de las SET requeridas, por lo cual no es un factor decisivo.

Fig. 1. Sistema de alimentación dual



De acuerdo con Barcenilla [11, p. 36], para las rutas cuyas distancias son mayores de 100 km, el sistema 2x25 kV es más económico en comparación con el sistema 1x25 kV, pero esto depende en gran medida de las fuentes de alimentación necesarias y las distancias que hay a éstas.

V. FUERZA DE TRACCIÓN

La fuerza de tracción proviene del par de torsión del motor convertida en la fuerza de empuje disponible para mover un tren, en el punto de contacto entre la rueda y el riel, y es paralela a la dirección de movimiento [12]. La fuerza de tracción tiene tres categorías, la fuerza de arranque o inicial, la continua y la máxima.

A. Fuerza de Tracción Inicial

La fuerza de tracción inicial se calcula mediante la Ecuación (2) [13].

$$TE_{max} = \mu \times W \quad (2)$$

Donde μ es el factor de adhesión que depende de la rigidez de los materiales en contacto, y W es la sumatoria de pesos en el eje en (N). Para la locomotora empleada, el factor de adhesión moderado es de 0,25, con un esfuerzo de tracción máximo de 316 kN que se puede usar en todas las condiciones [14, p. 3]. Así mismo, si se compara con las locomotoras europeas series TRAXX, tienen un factor de adhesión del 36%, el cual es más alto debido a su menor peso, suponiendo igual fuerza tractora para ambas locomotoras. A menor factor de adhesión se puede lograr una mejor aceleración [4, p. 58]. Otra consideración, no menos importante, es que la fuerza de tracción inicial no depende directamente de la potencia de los motores de tracción.

B. Fuerza de Tracción continua

Se presenta a bajas velocidades y puede ser constante, i.e., igual a la fuerza de tracción inicial o de pendiente negativa hasta el punto de cambio de régimen de velocidad o donde la fuerza de adhesión se iguala con la fuerza tractora. Bajo buenas condiciones de adherencia entre el riel y la rueda, el factor de adhesión estático puede ser de 0,32, lo cual equivale a una superficie de contacto seco, y aplicado al caso de la locomotora ALP 45DP, se obtiene una velocidad crítica de 54,14 km/h.

C. Fuerza de Tracción a Plena Potencia

Es la fuerza de tracción continua en (N) que puede mantenerse de manera indefinida y está determinada por la relación entre la potencia nominal en los motores en (W) y la velocidad en (km/h), como se define en la Ecuación (3).

$$F = \frac{P}{v} \times \eta \times 3,6 \quad (3)$$

La fuerza de tracción a plena potencia varia inversamente con la velocidad a una potencia constante [15, p. 166]. Esta ecuación es útil cuando hay equilibrio dinámico, i.e., aceleración igual a cero.

VI. RESISTENCIA A LA RODADURA

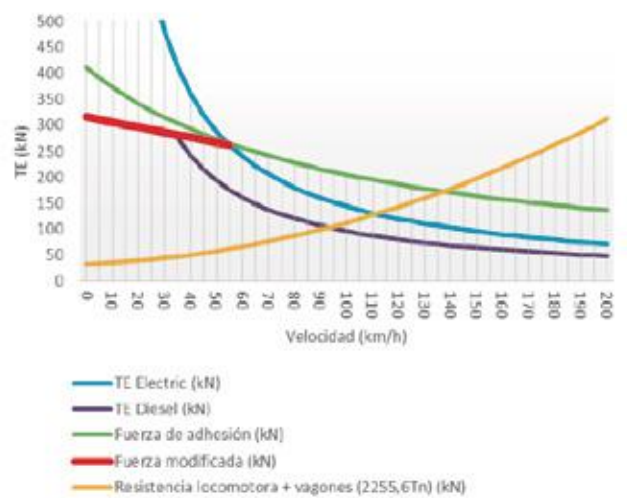
La resistencia al movimiento es un insumo importante para planificar las cargas máximas, la velocidad, y el consumo de energía del tren en pendiente cero y sin curvas. Este valor se halla mediante la ecuación de la Canadian National de 1990 [16], presentada en la Ecuación (4) expresada en (N/t).

$$R_r = 7,36 + 80,09 \frac{N}{w} + \frac{v}{10,94} + \frac{C \times A \times v^2}{540,75 \times w} \quad (4)$$

Donde w es el peso total de la locomotora o vagón en (Tn), el coeficiente dependiente del tipo de vehículo. En este caso se selecciona el valor de 24,0 para la locomotora líder y 5,5 para las locomotoras remolques; los vagones por su parte manejan un coeficiente de 5, es la velocidad en (km/h), es el área de la sección transversal de la locomotora o vagón en (m²). Para analizar los vagones vacíos se debe modificar la sección del vagón a 2,32m², es el número de ejes por locomotora o vagón.

Partiendo de una sola locomotora acoplada a cincuenta vagones, que equivale a un peso total de 2255,6 Tn, asumiendo la eficiencia η igual a uno, debido a que el fabricante especifica la potencia en la rueda, y con la información recopilada anteriormente; se pueden determinar las curvas de tracción para la locomotora ALP45 DP en modo eléctrico puro y diésel - eléctrico, la fuerza de resistencia en función de la fuerza modificada, que es equivalente a la fuerza de tracción máxima, y la fuerza de adhesión en función de la velocidad, como se muestra en la Figura. 2.

Fig. 2. Fuerzas en función de la velocidad para una locomotora ALP 45DP



Se puede deducir a partir de la gráfica que a poca velocidad la fuerza tractora está limitada por la adhesión y no por la potencia [12]. Además, la velocidad máxima a la que puede circular el tren cargado en pendiente cero se da cuando la fuerza de tracción se iguala con la resistencia a la rodadura a 2255,6 Tn; por lo tanto, en modo eléctrico puro puede desarrollar una velocidad máxima de 111,2 km/h aproximadamente, y en modo diésel - eléctrico de 93,1 km/h, lo que permite concluir que este último es el respaldo adecuado para garantizar la operación del tren cuando se presenten interrupciones del servicio de energía o para la electrificación por tramos.

A pesar de que la velocidad obtenida para un tren con una sola locomotora en cada modo de operación es buena, la velocidad a la que se requiere transitar bajo condiciones normales debe ser de 120 km/h para evitar retrasos en los despachos de mercancías y no afectar la frecuencia de operación del sistema férreo en conjunto. Es por esta razón que se deben acoplar más locomotoras con el fin aumentar la fuerza de tracción y la potencia equivalente. Adicionalmente, es importante considerar la fuerza de resistencia por pendiente longitudinal. Lo que respecta a la resistencia por curvatura, no se tienen en cuenta para los estudios del presente trabajo y hacen parte de la ingeniería de detalle.

VII. RESISTENCIA POR PENDIENTE LONGITUDINAL

La resistencia por pendiente longitudinal depende de la masa del tren y la pendiente, como se expresa en la Ecuación (5) en (N/t), por lo tanto, a mayor pendiente positiva (ascenso) se requiere más potencia en los motores de tracción para vencer dicha resistencia y de este modo evitar la disminución de la velocidad; sin embargo, cuando la pendiente es negativa (descenso), deja de ser una fuerza opositora al movimiento para convertirse en una fuerza favorable al esfuerzo de los motores de tracción. Es allí donde se puede almacenar o entregar la energía sobrante (frenado regenerativo), para el posterior arranque o ascenso de ese mismo u otro tren.

$$R_p \approx 1000[kg] \times 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times \frac{p}{100} \% \approx 98 \times p \quad (5)$$

Donde p es el porcentaje de pendiente de la vía. Finalmente, se puede evaluar la fuerza sobrante del tren en función de la velocidad de acuerdo a la Ecuación (6), expresada en (N).

$$F_s(v) = TE(v) \times n_{LT} - \{(R_{r(L)} + R_{P(L)}) \times w_L + (R_{r(LR)} + R_{P(LR)}) \times w_{LR} \times (n_{LT} - 1) + (R_{r(v)} + R_{P(v)}) \times w_v \times n_v\} \quad (6)$$

Donde $R_{P(L)}$, $R_{P(LR)}$ y $R_{P(v)}$ es la resistencia por pendiente longitudinal de la locomotora líder, remolques, y vagones en (N/t) respectivamente y n es la cantidad total de locomotoras suponiendo que son de la misma referencia. Cuando el resultado es positivo, significa que se tiene fuerza disponible para acelerar el tren y la máxima velocidad se obtiene cuando la fuerza sobrante es igual a cero.

Para el caso donde se tienen cuatro locomotoras sometidas a una pendiente del 2%, se puede desarrollar una velocidad máxima de 91,3315 km/h con una potencia en el riel de 16 MW en modo eléctrica y 64,66177 km/h con una potencia en el riel de 10,74 MW en modo diésel - eléctrica, que equivale a la potencia máxima sumada que puede entregar el arreglo de locomotoras, discriminado para cada modo de operación; sin embargo, se debe tener en cuenta que este tren tiene una distancia total de más de 715 m, lo que podría significar que no todas las locomotoras estén expuestas a esta pendiente y por consiguiente se presente una redistribución de esfuerzos. No obstante, a pesar de obtener buenos resultados, estos se pueden ver afectados si se tiene en cuenta la resistencia por curvatura.

Partiendo del hecho de que esas mismas cuatro locomotoras puedan cumplir con las condiciones más exigentes del caso del estudio (velocidad de 120 km/h en pendientes del 2%), requieren 22,53 MW totales en el riel. Es por esto que, asumiendo una eficiencia de la locomotora del 87% en modo eléctrica, y un FP de 0,9, la potencia suministrada en el pantógrafo es de alrededor de 28,8 MVA.

Pero si adicionalmente hay un tren viajando en sentido contrario con pendiente negativa máxima del -2% (regenerando mínimo el 20% de energía para países montañosos) [17], la potencia mínima que puede estar entregando a la red es aproximadamente 2,3 MW, la cual puede ser de ayuda para el tren que está en ascenso.

VIII. FRECUENCIA DE DESPACHO

La flota completa de trenes se puede determinar a partir de la carga anual máxima requerida y la duración del viaje a la velocidad deseada, que tomando como referencia la tesis de Roldán [2], se estima que la duración de parada en cada estación es, en las terminales (Envigado y Arboletes) de 2 h, las multimodales (Caucasia y Montería Sur) de 1,5 h, y las intermedias (Bello, Barbosa, Amalfi, El Pato y Planeta Rica) de 0,5 h. Por lo tanto, se obtiene una duración de viaje de 13 h, 11 min por trayecto y 22 h, 22 min en total para ambos trayectos, i.e., Envigado - Arboletes - Envigado. Luego, sabiendo que el tren está cargado a su máxima capacidad en el trayecto Arboletes - Envigado, definido por las importaciones (4000000 Tn/año); las cuales son mayores en comparación con las exportaciones, se obtiene que la flota debe movilizar un máximo por trayecto de 10958,9 Tn/día, lo que equivale a decir que se deben despachar 8 tren/día para una carga pagada de 1525 Tn/tren repartida en cincuenta vagones como se determinó anteriormente. Finalmente, la frecuencia está determinada por la relación entre la duración de viaje por trayecto y la cantidad de trenes que se deben despachar por día, dando como resultado 1.83 h/tren, donde cada tren hace el trayecto Envigado - Arboletes - Envigado por día, para tener una holgura en los tiempos que el tren se demora en alcanzar la velocidad máxima y las pérdidas de velocidad que se presentan en los ascensos y las curvas.

IX. UBICACIÓN DE LAS SET Y AT

La ubicación de las SET se hace teniendo en cuenta la distancia mínima a las posibles fuentes de conexión, coincidencia con las estaciones de parada, las recomendaciones de diferentes experiencias y autores [5], [10], [8], [9], pero limitadas preferiblemente a 60 km, con el objetivo de distribuir tres autotransformadores AT, sin exceder las distancias máximas recomendadas para éstos. Es importante aclarar que la cantidad de AT puede aumentar si se considera mayor separación entre las SET, por lo tanto, en el apartado XI se determina si estas distancias son adecuadas una vez conocidas caídas de tensión, sin embargo, la ubicación y cantidad óptima de SET y AT no se tiene en cuenta para el alcance del presente estudio, que podría implicar, además, correcciones en la potencia disponible para las locomotoras, velocidad de operación y parámetros de la catenaria.

Cada SET alimenta un tramo de catenaria denominado sector. Esta a su vez, por tener dos transformadores de potencia, se divide en subsectores alimentados de manera independiente por cada transformador bajo condiciones normales.

La ubicación de los AT se hace conservando una distancia igual entre ellos para SET subsecuentes. Están compuestos por un autotransformador medio (ATM) ubicado en el punto medio entre las SET con dos AT, uno por cada subsector. Cada ATM tiene gabinete de control, ya sea para realizar maniobras por contingencia N-1, N-2, por falla o por mantenimiento de alguno de los AT. Adicionalmente, por dos Autotransformadores Intermedios (ATI) ubicadas cada uno aproximadamente en medio de la SET y la ATM, se cuenta con gabinete para aislar el ATI ante falla o mantenimiento del AT [9].

Como se puede observar en la Tabla I, en las estaciones terminales de Arboletes y Envigado no se considera instalar SET debido a que se estaría subutilizando un sector, pues se puede aprovechar la regulación de tensión que provee la fuente subsecuente, aunque normalmente en este tipo de estaciones sí se instala ATI. Para el caso de los últimos 45 km, i.e., entre la SET Montería Sur y ET Arboletes, hay tres ATI subsecuentes sin ATM por la falta de SET, optando por esta condición debido a la falta de fuentes de alimentación cercanas y a que el tramo es mayormente plano, lo que podría disminuir las potencias requeridas y por ende las caídas de tensión en la cola del circuito. Obsérvese que las SET1 Bello, SET5 El Pato, SET6 Caucasia, SET7 Planeta Rica coinciden con una estación de parada, lo que favorece los arranques sin caídas de tensión ni pérdidas en la catenaria. Para las estaciones de Barbosa, Amalfi y Montería Sur (que se podría cambiar de ubicación para coincidir con la SET 8 Montería Sur), y con excepción de las terminales, no fue posible hacer que coincidieran con alguna SET manteniendo los criterios de ubicación empleados para este caso, no obstante, coinciden con algún AT.

TABLA I

Ubicación de las SET, ATI y ATM para la ruta Sanín – Poveda.

Nombre	Distancia entre SET (km)	Distancia entre ATI (km)	Estaciones de parada
ATI1 Envigado		0	ET Envigado
ATI2 Universidad		10	
SET1 Bello	20		EI con taller y patio Bello
ATI3 Girardota		14	
Grupo ATM 4 Barbosa		13	EI Barbosa (47.6km)
ATI5 Pradera		13	
SET2 Porcecito	49		
ATI6 Hojas Anchas		11	
Grupo ATM7 La Leona		10	
ATI8 Guacabe		10	
SET3 Porce II	41		
ATI9 Malabrigo		13	
Grupo ATM 10 Amalfi		13	EI Amalfi (134.5km)
ATI11 Altamira		13	
SET4 Madreseca	54		
ATI12 Galilea		11	
Grupo ATM13 El bosque		11	
ATI14 Buenos aires		11	
SET5 El Pato	45		EI el Pato
ATI15 Bellavista		15	
Grupo ATM 16 Cacerí		15	
ATI17 Guarumo		15	
SET6 Caucasia	60		EIM Caucasia
ATI18 La Apartada		16	
Grupo ATM 19 Buenavista		16	
ATI20 Plaza Bonita		16	
SET7 Planeta Rica	65		EI Planeta Rica
ATI21 El Higuito		16	
Grupo ATM22 El pozón		15	
ATI23 Montería Sur		15	EIM Montería Sur
SET8 Montería Sur	61		
ATI24 El Tambo		15	
ATI25 Norina		15	
ATI26 Arboletes		15	ET Arboletes

Se puede determinar que bajo condiciones de operación normal sólo hay dos trenes alimentados por un mismo transformador de tracción o subsector asociado a éste.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las condiciones analizadas en el apartado VII, se seleccionan transformadores de tracción de 30 MVA. Si se tuviera en cuenta la condición más crítica, la sobrecarga de dicho transformador sería de aproximadamente del 130%, que de acuerdo con la norma EN50329 [18], para líneas férreas principales puede durar máximo 2h.

Las características de los transformadores de tracción tienen una impedancia de cortocircuito entre fases y neutro de 15% y entre fases de 5% con nivel de corto circuito del 12 kA mientras que los AT tienen una impedancia de cortocircuito del 5% y un nivel de corto circuito de 2,5 kA. de acuerdo a Pilo [19, p. 133], las pérdidas en vacío (hierro) del 1% y con carga (cobre) del 2% para una eficiencia del 97%.

Para la selección de la potencia del AT, se debe tener en cuenta que por sus devanados circula como máximo la mitad de la corriente requerida por el tren (i.e., en el momento en que la impedancia de la catenaria es despreciable y no hay aporte de corriente al AT subsecuente), que para el caso de estudio es 10,2 MVA. Por lo tanto, se seleccionan AT de 10 MVA teniendo en cuenta que estos también deben cumplir con las sobrecargas permitidas por la norma mencionada anteriormente.

X. SELECCIÓN DE LA CATENARIA

Para determinar el calibre del conductor, se parte de la corriente nominal que fluye del secundario del transformador de tracción a la catenaria en una condición de pendiente y carga frecuente, sin considerar frenado regenerativo. Por ejemplo, cuando hay dos trenes que viajan en sentido contrario que están alimentados de un mismo subsector y no coinciden con una estación de parada. Se considera entonces un tren en ascenso en sentido Arboletes – Envigado sobre una pendiente del 2%, cargado en su totalidad (1525 Tn pagadas), requiere una potencia en el pantógrafo de 20.43 MVA como máximo, limitado por potencia total de las locomotoras que pueden alcanzar una velocidad de 91.33 km/h, y el segundo tren transitando en terreno plano en sentido Envigado – Arboletes con una carga pagada de 953.125 Tn (correspondiente a las 2500000 Tn/año de exportaciones), equivalente a treinta y dos vagones cargados totalmente, y dieciocho descargados,

requiere una potencia en el pantógrafo de 4.66 MVA, para un total de 25.09 MVA, lo que equivale a una demanda de corriente de 1000 A aproximadamente, que se distribuye en la catenaria dependiendo de la posición de cada tren, sin considerar las pérdidas. Es importante aclarar que, aunque hay condiciones más severas, éstas no son de régimen permanente y será la simulación la que permita determinar la duración de las sobrecargas que puedan presentarse en el cable, las pérdidas de potencia por efecto Joule y las caídas de tensión en determinada posición. Como caso práctico, se considera una alternativa del repositorio de catenaria obtenido por Pilo, Rouco, & Fernández [20], usando el procedimiento para optimización multi-criterio descrito en Pilo et al. [21], como se muestra en la Tabla II.

TABLA II

Conductores empleados para el caso de estudio. [20]

Catenaria	Caso I (C5)	Capacidad a 80 °C (A)	Resistencia a 20 °c (Ω/km)
Hilo de contacto	AC 150	540	0.12
Sustentador	Cu-ETP 95	380	0.193
Feeder positivo	-	-	-
Feeder negativo	LA-110	330	0.3066
Cable de retorno	LA-110	330	0.3066
Péndolas	Bz-16	100	-
Riel	-	-	0.0339

La electrificación parcial contempla usar catenaria a lo largo de todos los centros urbanos, donde es importante tener cero emisiones, en los de alta pendiente, donde se requiere mayor esfuerzo tractor, y en cada una de las paradas intermedias no electrificadas (10 km), de manera que la energía de los arranques las aporte el sistema eléctrico y no el motor diésel.

XI. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE TRACCIÓN

En este aparte se hacen algunos comentarios respecto a los resultados arrojados por la simulación realizada en OpenTrack., que simula el control de la operación en curso y la dinámica de manejo, y el OpenPowerNet que se compone de dos módulos: el OpenPowerNet PSC, que simula los voltajes en la red eléctrica con respecto al consumo de corriente y la posición de la ruta, y el módulo de simulación de motor OpenPowerNet ATM que simula la corriente requerida y el esfuerzo logrado con respecto al voltaje de línea disponible en la posición de la ruta y DlgSILENT para determinar las fluctuaciones de voltajes ocasionadas en la red trifásica, desbalances y flicker, que se comparan con los estándares internacionales más relevantes de la CPE. El trazado se considera en línea recta, i.e., no se tiene en cuenta las curvas.

A. Simulación en OpenTrack y OpenPowerNet

A continuación, se hacen algunos comentarios respecto a los resultados arrojados por la simulación de dos escenarios distintos.

1. Escenario con un solo tren:

El tren cubre el trayecto Arboletes – Envigado, donde el consumo de energía es mayor debido a que está en ascenso. En la Figura 3 y Figura 4 se observa el comportamiento de la velocidad y potencia requerida por el tren a lo largo del recorrido respectivamente.

Fig. 3. Velocidad en función de la distancia

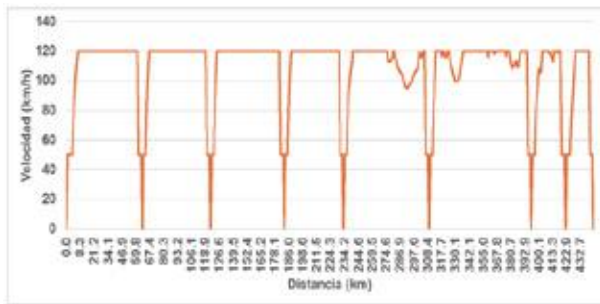
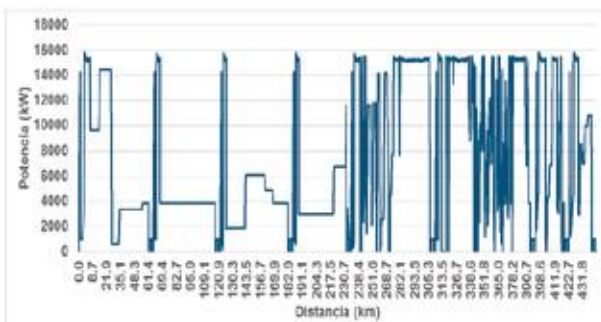


Fig. 4. Potencia en función de la distancia



De acuerdo con los resultados, se puede concluir que la velocidad se mantiene en 120 km/h durante la mayor parte del trayecto, excepto en un tramo entre las estaciones de El Pato y Amalfi donde llega aproximadamente a 95 km/h, lo cual no está muy alejado de los resultados obtenidos analíticamente para una pendiente del 2%. Este mismo fenómeno se presenta entre las estaciones de Amalfi y Barbosa, donde la velocidad llega a descender a los 100 km/h. A pesar de esto, se considera que estas condiciones no afectan la operación normal del tren para cumplir con las metas proyectadas, correspondientes a la carga que deben movilizar por día.

Es interesante anotar que, en el caso que se opte electrificar por partes (por costos de inversión inicial), se recomienda iniciar el proyecto instalando SET en las estaciones de parada excepto las finales, y se instale una catenaria de mínimo 5 km en ambos lados de la SET con el objetivo de que el tren alcance la velocidad máxima considerando pendiente menor o igual a cero y aceleración de 0.11 m/s², optimizando la operación en modo diésel – eléctrico sin sobreesfuerzos de los motores diésel.

2. Escenario con dos trenes:

En este caso se consideran dos trenes iniciando operación desde las estaciones terminales, i.e., uno arranca desde la estación Arboletes y el otro desde la estación Envigado. Esta condición es importante porque permite verificar la potencia máxima en un punto determinado donde ambos trenes están alimentados de un mismo subsector como insumo para simular los desbalances que las SET pueden ocasionar en las SE de alimentación y el SIN, la duración de las sobrecargas durante el recorrido, y el fenómeno de flicker. En la Tabla III se observa la potencia instantánea máxima requerida por cada SET de acuerdo a los resultados de la simulación.

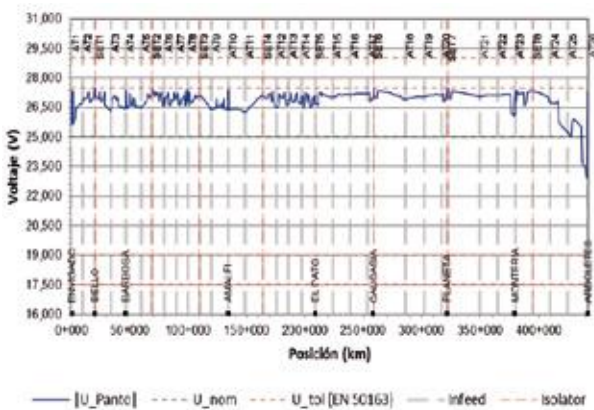
TABLA III
Potencia instantánea máxima por cada SET

	P (MW)	Q (MVA _r)	S (MVA)
SET1 Bello	15,59	2,53	15,79
SET2 Porcecito	12,02	1,07	12,07
SET3 Porce II	11,95	1,16	12,00
SET4 Madreseca	12,24	1,05	12,29
SET5 El Pato	23,89	1,80	23,96
SET6 Caucasia	13,18	1,05	13,22
SET7 Planeta Rica	13,57	1,20	13,62
SET8 Montería Sur	17,70	5,65	18,58

La SET El Pato es la que más carga registra durante toda la simulación, debido a que se encuentra en la mitad del trayecto y a que en este punto la misma SET alimenta dos trenes. Sumado a esto, las pendientes empiezan a aumentar en dirección a Envigado. Lo más interesante es que ninguna SET presenta sobrecarga, aunque sería necesario hacer una simulación del tráfico ferroviario completo para determinar la duración de las sobrecargas que se podrían presentar de acuerdo con los casos calculados analíticamente. Luego, sería necesario observar el comportamiento en particular de las potencias instantáneas en las SET Madreseca y Porce II, donde los trenes están sometidos a pendientes de hasta del 2% en gran parte del trayecto (km 90 + 000 hasta el km 186 + 000).

Por otro en la Figura 5 se observa el comportamiento del voltaje respecto a la posición del pantógrafo en el trayecto, y se delimitan los subsectores en cada SET con sus respectivos AT.

Fig. 5: Voltaje en el pantógrafo respecto a la posición



En este caso no se sobrepasan los límites mínimos y máximos permanentes permitidos por los estándares de la IEC 60850 o EN 50163. El voltaje mínimo es de 22,898 kV, el cual se presentó en la estación Arboletes, que corresponde a la posición más alejada de una SET (aproximadamente a 47 km), teniendo en cuenta que es una zona de pendientes muy pequeñas. El voltaje máximo es de 27,438 kV, en un punto muy cercano a la SET Bello (aproximadamente al km 20 + 487). Por lo tanto, en términos de regulación de tensión se puede inferir que la selección de la catenaria fue adecuada sin caídas de tensión considerables (no se incluyó el feeder positivo).

B. Simulación en DigSILENT

Entre las SET1 y 4 se considera una potencia instantánea de 32,95 MVA, equivalente a 29,655 MW y 14,363 MVAR, debido a que es el tramo de la ruta

donde se presentan mayores pendientes. Entre las SET6 y 8 se considera una potencia instantánea de 25,09 MVA, equivalente a 22585 MW y 10,936 MVAR, correspondiente al tramo donde las pendientes son pequeñas y cercanas a cero. En la SET 5 se tiene en cuenta el resultado de la simulación de la Tabla III. Las SE candidatas para alimentar las SET se seleccionaron de acuerdo con su ubicación usando Google Earth como se observa en la Figura 6.

Se emplea el ModeloEctricoMP_04-2017_Agentes que tiene modelado el SIN a mediano plazo para el trimestre 4 del 2017, mediante la ruta de la Compañía Expertos en Mercados S.A. E.S.P. (XM): Planeación - Planeación a mediano plazo - Informe de planeamiento operativo eléctrico del mediano plazo IPOEMP. El caso de estudio se divide en dos escenarios para cada periodo: de acuerdo con la topología (Study Case) y condiciones operativas (Operation Scenario), referente a las demandas, aperturas, cierres, cambiadores de tomas de los transformadores y despacho de generación. En ambos escenarios se emplea el periodo 20 (i.e., 19:00 a 19:59) donde se tiene la punta dos de demanda nacional, siendo la condición más crítica. Es importante aclarar que no se selecciona el modelo a largo plazo debido a la incertidumbre que se tiene en el crecimiento de la demanda.

El método de cálculo empleado para el flujo de carga es el AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC).

Cada SET se compone de dos transformadores de tracción con los parámetros del aparte IX. El grupo vector está configurado por el lado de alta en estrella (Y) single phase y, en lado de baja en estrella neutro (YN) dual/bi conectado a una barra de 55 kVLL y 27.5 kVLN nominal, con tecnología de fase "bifásica" neutro (BI-N), el cual se aterriza.

Fig. 6: Ubicación de las posibles SEs para alimentar las SET



En la figura anterior se identifican la ruta en verde, las LTs en color rojo y amarillo para Nivel 4 o STN respectivamente, la ubicación de las SEs y SETs se identifican con una marca de posición "S" roja y "tren" azul respectivamente.

En la Tabla IV se muestran los resultados de los desbalances obtenidos, con las respectivas fuentes opcionales que deben cumplir con ciertas condiciones, como garantizar la rotación de las fases a las cuales se conectan los transformadores de tracción en el lado de alta, para que el desbalance mediante factor de secuencia negativa sea menor al 2%, de acuerdo a los estándares de la IEC 61000-2-12 [22, p. 25] y la EN 50160 [23]. No obstante, la SET2 Porcecito, SET7 Planeta Rica y SET8 Montería Sur, no cumplen y sería necesario evaluar otras acciones remediales entre las cuales se puede considerar los Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC, por sus siglas en inglés), aclarando que estas fuentes no son robustas y ya tienen un desbalance inherente a la conexión de las SET. Adicionalmente, se indica la relación entre la variación de la potencia aparente (ΔS), considerando las máximas instantáneas de cada SET y las potencias de cortocircuito en la barra (SSC) de cada fuente, que se simula en DigSILENT mediante el método de la IEC 60909 [24] para una falla monofásica franca a tierra con tiempo de aclaración de 1 s.

TABLA IV

Distancias de las LTs, Desbalances y variaciones de potencia por SET de acuerdo a las fuentes

	Fuente	Distancia (km)	Desbalance (%)	F u e n t e opcional	$\Delta S/S_{sc}$ (%)
S E T 1 Bello	Bello 110kV	0.15	1.45		1,99
S E T 2 Porcecito	Barbosa 110kV	19.6	2.29		3,59
S E T 3 Porce II	El Salto 110kV	9.1	1.65		1,86
S E T 4 Madreseca	Porce II 220kV	43.6	Menor al 2		1,29
SET5 El Pato	Porce II 220kV	79.3	1.22		0,94
		79.4	Menor al 2	Cerromatoso 110kV	2,06
S E T 6 Caucasia	Caucasia 110kV	2.65	0.91		9,65
S E T 7 Planeta Rica	Montería 220kV	51.7	2.08		4,88
		51.7	Mayor del 3%	Nueva Montería 110kV	6,06
S E T 8 Montería Sur	Montería 220kV	30.2	2.08		4,88
		30.2	Mayor del 3%	Montería 110kV	6,47

Empleando el método analítico mediante las variaciones máximas por minuto de acuerdo con con el estándar de la IEC 61000 3-7 [25, p. 22], se deduce que en ningún caso se puede presentar más de diez variaciones relativas de potencia por minuto, sin embargo, no es concluyente en cuanto a la cantidad máxima para cada caso. Otro aspecto importante es que la variación de potencia no es instantánea y está definida por la corriente de arranque del grupo de locomotoras, además en cualquier caso sólo se podría presentar el arranque de dos trenes en un mismo instante cuando se encuentren parqueados en estaciones diferentes alimentadas de una misma SET y que suceda durante un minuto.

XII. ANÁLISIS FINANCIERO

Los costos de inversión están enfocados en comparar tres posibles escenarios, partiendo del hecho que toda la infraestructura ferroviaria ya se encuentra finalizada y lista para entrar en explotación comercial, incluso en los casos donde se emplean locomotoras duales y eléctricas puras, i.e, donde la ruta se encuentra parcialmente o totalmente electrificada. Los escenarios a analizar emplean las siguientes locomotoras:

- Locomotoras diésel – eléctricas de referencia MP40PH-3C, compuestas por un motor EMD 710G3B-EFI-T2 de 16 cilindros y 4000 HP que desarrolla una velocidad máxima de 150 km/h [26, p. 50]. La potencia en la rueda puede estar alrededor de los 3400 HP, asumiendo un 85% de eficiencia [12].

- Locomotoras duales ALP 45DP de 3600 HP en modo diésel y 5360 HP en modo eléctrico, para ambos casos especificado en la rueda. Locomotora eléctrica pura ALP 46 de 5600 kW, que puede desarrollar una velocidad máxima de 150 km/h.

A. Información Financiera

En este trabajo se evalúan los costos para el escenario con locomotora eléctrica pura, que requiere en principio que toda la ruta esté electrificada, y para el escenario con locomotora dual, en la cual se considera la electrificación parcial entre las estaciones intermedias Amalfi, El Pato, Planeta Rica y la intermedia multimodal Caucasia, con catenaria a 5 km en ambos lados empleando las ecuaciones del MUA, correspondiente a la distancia que necesitaría el tren idealmente para alcanzar la velocidad deseada de 120 km/h en terreno plano a una aceleración constante de 0,11 m/s².

Para el caso de las estaciones terminales de Envigado e intermedia de Barbosa, éstas se alimentan mediante catenaria desde la SET que se propone instalar en la EI con taller y Patio de Bello, con el fin de aprovechar la distancia que hay entre estas y la regulación de tensión, que no justificaría la instalación de una SET adicional en principio. Finalmente, un caso similar ocurre entre la EIM Montería Sur y la ET Arboletes, que sugiere ubicar una SET en un punto donde sea equilibrada la distancia de las catenarias para ambos lados. En la Tabla V se expone la propuesta de ubicación de las SET con sus respectivos ATI (si los requiere).

TABLA V

Ubicación de las SET y ATI la ruta Sanín - Poveda parcialmente electrificada

Nombre	Distancia (km)	Distancia entre ATI (km)	Estaciones de parada
ATI1 Envigado	0	0	ET Envigado
ATI2 Universidad	10	10	
SET1 Bello	20		EI con taller y patio Bello
ATI3 Girardota	34	14	
ATI4 Barbosa	47	13	EI Barbosa (47,6km)
ATI5 La Herradura	52	5	
ATI6 Malabrigo	131	5	
SET2 Amalfi	136		EI Amalfi (134,5km)
ATI7 Altamira	141	5	
ATI8 Buenos aires	204	5	
SET3 El Pato	209		EI el Pato
ATI9 Bellavista	214	5	
ATI10 Guarumo	264	5	
SET4 Caucaasia	269		EIM Caucaasia
ATI11 La Apartada	274	5	
ATI12 Plaza Bonita	329	5	
SET75Planeta Rica	334		EI Planeta Rica
ATI13 El Higuito	339	5	
ATI14 El pozón	375	5	
ATI15 Montería Sur	380	15	EIM Montería Sur
ATI16 Leticia	395	15	
SET6 EI Tambo	410		
ATI17 Norina	425	15	
ATI18 Arboletes	440	15	ET Arboletes

De acuerdo con la tabla anterior, solamente se requieren seis SET, compuestas cada una por un transformador de tracción, debido a que el tramo de catenaria a alimentar es muy corto, lo que implicaría sobrecostos innecesarios en los primeros años de operación. Adicionalmente, en caso de contingencia N-1, se tendría respaldo de la locomotora en modo diésel - eléctrico, y para una contingencia N-2, no aplicaría este esquema por la separación eléctrica entre SET adyacentes. Los ATI necesarios son dieciocho sin grupo de ATM.

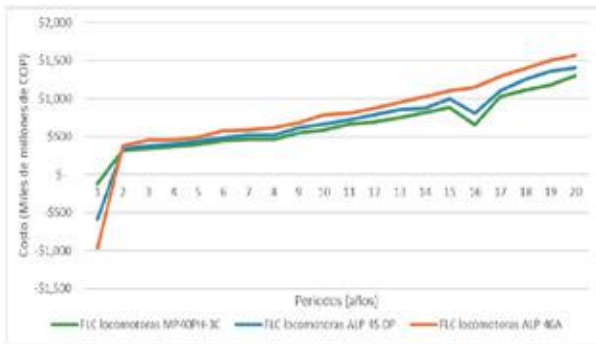
La distancia de la catenaria en vía sencilla es de 147 km, que adicionando 9 km electrificados para del cambiador de vías en las estaciones de parada, resulta un gran total de 156 km. De este modo, considerando la misma situación para la ruta totalmente electrificada, se obtiene un total de 451 km de catenaria.

Los costos del sistema eléctrico total y parcialmente electrificado se estiman con base en los estudios presupuestales realizados por Llavina [27, pp. 75-82]. En este caso se estiman los costos por unidad de los transformadores de tracción y AT con un 25% adicional para los demás equipos que conforman la SET (transformador de potencial, de corriente, pararrayos, celdas encapsuladas de 55 kV, seccionadores, aisladores, barras), el costo de la catenaria por kilómetro de acuerdo a Keen y Phillpotts [28, p. 5], y el costo de las LT de acuerdo con las resoluciones CREG 026 de 1999 [29] y 097 de 2008 [30].

B. Flujo de caja inversionista

El flujo de caja libre se presenta en la Figura 7 para los tres casos evaluados en los veinte periodos. De allí se puede deducir que a pesar de que en el primero año se requieren mayores inversiones en la locomotora eléctrica pura, seguida por la dual y la diésel - eléctrica, esta inversión se ve retribuida a partir del segundo año, con una diferencia cada vez más marcada conforme avanzan los periodos. Por lo tanto, la locomotora eléctrica sería de gran interés desde el punto de vista económico, aparte de los otros beneficios comentados durante el desarrollo del estudio técnico. Sin embargo, el flujo de caja libre no es por si solo determinante para determinar el interés o rentabilidad del proyecto, por lo que requiere evaluarse mediante otros indicadores como el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). No obstante, este último no se tiene en cuenta debido a que, al no contemplar las inversiones anteriores al año de entrada en explotación comercial, se obtienen unos porcentajes muy altos.

Fig. 7: Flujo de caja libre del proyecto



El VPN permite conocer el valor monetario del proyecto al día de hoy. Debido a que la Tasa Interna de Retorno (TIR) no se puede evaluar para este caso, no se tendría referencia para comparar con la tasa de descuento o una tasa mínima aceptable por el inversionista. Aunque es un tema de mucha discusión y cuyo valor puede variar considerablemente, el resultado del VPN, incluso a tal punto de utilizar tasas menores o iguales al 12%, hace más rentable la locomotora dual y la eléctrica pura en comparación con la diésel - eléctrica, pero a tasas mayores o iguales al 16%, hace más rentable la locomotora diésel - eléctrica. Por lo tanto, y para ser conservativos, se asume una tasa de descuento igual al 10%, que es mayor a la tasa de interés e indica que es favorable para el proyecto. En la Tabla VI se expone el VPN para cada uno de los casos donde la locomotora eléctrica es la que mayor margen de rentabilidad presenta y es la opción más atractiva para los inversionistas, con una diferencia de COP 442.630 millones y COP 396.086 millones respecto a la locomotora diésel - eléctrica y dual respectivamente. Por consiguiente, esta última se ubica como la segunda mejor alternativa.

TABLA VI

VPN para cada caso

Casos	VPN (Miles de millones de COP)
Locomotoras MP40PH-3C	\$4,503
Locomotoras ALP 45 DP	\$4,549
Locomotoras ALP 46A	\$4,945

XIII. CONCLUSIONES

El empleo de alimentación mediante sistemas en AC a la frecuencia industrial y en HV ha permitido cubrir rutas ferroviarias de gran longitud. En particular, el sistema 2x25 kV AC presenta grandes ventajas con respecto a las otras tecnologías por la disminución de

las pérdidas por efecto Joule, las menores caídas de tensión, la reducción de corrientes parásitas en comparación con los sistemas de CC, menores distorsiones armónicas y EMI. Permite la conexión directa a las redes de HV o Extra Alta Tensión (EHV, por sus siglas en inglés) sin necesidad de redes de distribución internas a frecuencias particulares (16.7 Hz o 25 Hz) [31], además, un mayor distancia entre SET. Así mismo, las locomotoras que funcionan mediante el esquema AC-DC-AC para el control de los motores de tracción en CA tienen mayor eficiencia.

La viabilidad financiera de la ruta Sanín-Poveda con locomotoras duales o eléctrica pura sería muy atractivas para cualquier inversionista, teniendo en cuenta que el precio del diésel es muy volátil y costoso en comparación con la energía eléctrica, para la cual, además, se podría pactar con el operador de red un precio mucho menor que el del mercado regulado. Incluso, la energía por kilómetro necesaria para el transporte de mercancías de una locomotora diésel - eléctrica es más del doble, como se demostró en el estudio económico, debido a su eficiencia reducida, lo que se traduce en disminución de la aceleración y velocidades más limitadas por las pendientes. Adicionalmente, se pudo evidenciar que los mantenimientos tienen un peso importante al momento de evaluar los tres tipos de locomotoras, donde la eléctrica pura vuelve a imponerse con menores costos asociados a este ítem.

La inversión inicial asociada a la electrificación parcial de la ruta Sanín - Poveda, correspondiente a un 34% del trayecto distribuido entre las estaciones de parada y en las áreas urbanas, representa un 47% de la inversión inicial con respecto a la electrificación completa. Esta electrificación parcial se propone para lograr aceleraciones mucho mayores con pérdidas menores, ahorrar combustible, y evitar impactos en la calidad del aire en zonas urbanas. Por lo tanto, bajo este escenario, el operador ferroviario podría empezar operaciones con el esquema de locomotoras duales, e ir amortizando las inversiones posteriores para completar la electrificación de la ruta con los mismos ingresos asociados a la operación de este sistema. Sin embargo, se requiere hacer una evaluación más precisa del proyecto considerando la posibilidad de ir electrificando gradualmente conforme aumenten los ingresos del proyecto luego de entrar en explotación comercial, y considerando además los gastos en mano de obra e imprevistos, de modo que al terminarla se podría migrar a las locomotoras eléctricas puras que tienen un mejor desempeño, menor costo de la energía, y gastos menores asociados al mantenimiento.

A futuro, las locomotoras duales diésel-eléctricas-catenaria podrían migrar a batería-catenaria, utilizando el sistema moderno de carga dinámica que utilizan los trolebuses modernos, en el que una batería de tamaño razonable mantiene el tren operando en los tramos de bajo consumo energético, mientras que la catenaria le permite arranques eficientes, mejor esfuerzo tractor en pendiente, posibilidad de intercambios de energía con otros trenes vía frenado regenerativo, y recarga de las baterías en movimiento.

XIV. REFERENCIAS

- [1] XM S.A. E.S.P., "Informe de Operación del SIN y Administración del Mercado", 2015. [En línea]. Disponible en: <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/2-6-Capacidad-efectiva-neta.aspx>. [Accedido: 29-abr-2017].
- [2] V. Roldán Gómez, "Viabilidad técnica y económica de ferrocarril eléctrico Valle de Aburrá - Mar Caribe", Trabajo de grado para optar al título de ingeniería civil, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, 2015.
- [3] J. T. Von Brown, "A planning methodology for railway construction cost estimation in North America", Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University, Ames, Iowa, 2011.
- [4] J. Pernička y T. Kuchta, "Railvolution - The Professional Two-Monthly Magazine Of Rail Transport Worldwide", vol. 10, pp. 53-58, dic-2010.
- [5] M. Kumar Jain, "Selection of Traction System Voltages | RailElectrica", 06-feb-2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.railelectrica.com/traccion-distribucion/selección-of-traction-system-voltage/>. [Accedido: 08-feb-2018].
- [6] F. Nyberg y R. Pollard, "Network Rail - A Guide to Overhead Electrification", Alan Baxter & Associates LLP, London, United Kingdom, 10, feb. 2015.
- [7] S. Frey, Railway electrification systems & engineering. Delhi: White Word Publications, 2012.
- [8] R. J. Hill, "Electric railway traction. Part 3. Traction power supplies", Power Engineering Journal, vol. 8, no 6, pp. 275-286, dic. 1994.
- [9] R. D. White, "AC/DC Railway Electrification and Protection", en IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems, 2014, pp. 1-42.
- [10] J. Delcan Arup, LTK Engineering services, y Lura Consulting, "Power supply and distribution systems technology assessment for metrolinx go system electrification", Metrolinx, Toronto, Canada, Monografía Electrification study, sep. 2010.
- [11] Z. Barcenilla Torres, "Cálculo mecánico de la catenaria de la línea de alta velocidad Madrid-Galicia. Tramo : Olmedo-Zamora", Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2010.
- [12] AREMA, "Module 5:Tractive Effort", 15-oct-2014.
- [13] V. Jayakumar y M. Kumar, Engineering Mechanics. New Delhi: PHI Learning, 2013.
- [14] D. Canetta y D. U. Bikle, "ECO4 Superior Products: Dual Powered Locomotives ALP-45DP for the north american railways", en Dual Powered locomotive, Lisboa, Portugal, 2010, p. 17.
- [15] L. S. Marks, Marks' standard handbook for mechanical engineers, Eleventh edition, [90. anniversary edition]. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [16] AREMA, "Economics of railway engineering and operations", en Manual for Railway Engineering, vol. Chapter 16, United States: AREMA, 2017.
- [17] J. Vitins, "Electric locomotives for freight corridors". IREE, 05-ene-2007.
- [18] UNE, UNE-EN 50329: aplicaciones ferroviarias: instalaciones fijas: transformadores de tracción. AENOR, 2004.
- [19] E. Pilo, "Diseño óptimo de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad", Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Madrid, 2003.
- [20] E. Pilo, L. Rouco, y A. Fernández, "An Optimization Procedure to Determine the Topology of AC Railways Power Supply Networks", 2007, pp. 333-340.
- [21] E. Pilo, L. Rouco, y A. Fernandez, "Catenary and autotransformer coupled optimization for 2x25kV systems planning", 2006, vol. 1, pp. 747-756.
- [22] IEC, IEC 61000-2-12 Part 2-12: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems, First edition. Geneva, Switzerland: IEC, 2003.

- [23] CENELEC, "EN 50160 - Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks", jul. 2010.
- [24] IEC, IEC 60909 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents, First edition. Geneva, Switzerland: IEC, 2001.
- [25] IEC y Transmission and Distribution Committee, IEC/TR 61000-3-7 Electromagnetic compatibility (EMC) : limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems, 2.0. Geneva, Switzerland: IEC, 2008.
- [26] Hatch Mott MacDonald, "GO Transit - Lakeshore Corridor Electrification Update of 2001 Addendum to 1992 Study", Hatch Mott MacDonald, 111 Wood Avenue South, Iselin, New Jersey, Final Report, abr. 2008.
- [27] J. Llavina Juan, "Diseño de las subestaciones eléctricas de tracción y centros de autotransformación asociados de una línea ferroviaria de alta velocidad", 2010.
- [28] P. Keen y R. Phillpotts, "Low Cost Electrification for Branch Lines", Department for Transport, Delta-Rail Group Limited, Derby, United Kingdom, DeltaRailES2010003 1, jul. 2010.
- [29] CREG, "Resolución No. 026". 21-jun-1999.
- [30] CREG, "Resolución No. 097". 26-sep-2008.
- [31] Q. Li, "Industrial frequency single-phase AC traction power supply system for urban rail transit and its key technologies", Journal of Modern Transportation, vol. 24, no 2, pp. 103-113, jun. 2016.

XV. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Metro de Medellín por su apoyo facilitando el uso, para fines académicos y de esta investigación, del programa OpenTrack-OpenPower-Net. Al ingeniero Gabriel Poveda Ramos por incentivar y promover el desarrollo ferroviario, y específicamente, por insistir en esta ruta ferroviaria viable, conveniente y pronto necesaria. A todos los miembros de la comisión de Ferrocarriles de la SAI por el apoyo en este trabajo.

XVI. RESEÑA AUTOR(ES)

Daniel Longas Sánchez. Ingeniero Electricista, Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Magister en Ingeniería de la UPB, actualmente trabaja con el grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica. longas.daniel@gmail.com

Andrés Emiro Díez Restrepo. Ingeniero Electricista UPB, Doctor en ingeniería, docente titular de la UPB, grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica. Andres.diez@upb.edu.co

Daniel Alberto Arroyave Molina. Ingeniero Electrónico UPB, docente cátedra de la UPB, grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía.

Armando Bohórquez Cortázar. Ingeniero Electricista UPB, Magíster en ingeniería, docente titular de la UPB, grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica.